

21世纪应用型本科规划教材

# 普通物理实验

## （力学、热学部分）

周小珠 谢 冰 吴兹起 主编

黄天宇 张 爽 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书是根据《高等学校应用物理学本科指导性专业规范》中物理实验知识体系而编写的,包含绪论、力学实验和热学实验的内容,属于基础物理实验。本书共有 21 个实验,其中有 13 个力学实验,8 个热学实验。绪论部分主要介绍基本物理实验方法、基本物理量、常用实验数据处理方法等,突出应用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

本书可作为高等院校本科物理学及相近专业第一层次物理实验课和本科非物理学理工类专业大学物理实验课的教材,也可供相关专业的读者学习、参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

普通物理实验. 力学、热学部分 / 周小珠, 谢冰, 吴兹起主编. —北京: 电子工业出版社, 2018.2

ISBN 978-7-121-33257-9

I. ①普… II. ①周… ②谢… ③吴… III. ①普通物理学—实验—高等学校—教材 ②力学—实验—高等学校—教材 ③热学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 306166 号

策划编辑: 王晓庆

责任编辑: 王晓庆

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 7.5 字数: 192 千字

版 次: 2018 年 2 月第 1 版

印 次: 2018 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 29.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: (010) 88254113, [wangxq@phei.com.cn](mailto:wangxq@phei.com.cn)。

# 前 言

2010 年国务院常务会议审议通过的《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020 年）》指出，“要加大教学投入，重点扩大应用型、复合型、技能型人才培养规模”。2014 年 2 月 26 日召开的国务院常务会更明确提出要开创新的职业教育模式，要引导一批地方普通本科院校向应用技术型院校转型。同年 3 月，教育部副部长鲁昕在中国发展高层论坛上透露，教育部计划将 600 多所地方本科高校（大部分是新建本科院校）向应用技术、职业教育类型转变。而我国普通高等院校共 1200 所左右，这就意味着有 50% 的高校将要转型，它们将更多地承担培养技术应用型人才的任务，特别是培养生产、服务一线技术工程师。可见，应用型人才培养作为我国高等教育人才培养体系中的重要组成部分，已经提上议程。新建本科院校已成为我国高等教育体系的重要组成部分，是我国高等教育大众化的有生力量。

2011 年，广西区政府同意在钦州学院的基础上筹建北部湾大学，被列为自治区重点推进项目。2013 年成为教育部首批应用型大学联盟理事高校，2014 年成为广西新建本科院校整体转型发展试点单位。

钦州学院虽然是应用型大学联盟理事高校，是新建本科院校整体转型发展的试点单位，但应用型教材建设滞后。如大学物理实验或普通物理实验教材，大多借用传统本科教材，这些教材相对而言内容较多，理论较深，在数据记录和处理上不够详细，学生完成实验并上交实验报告的效率不高，在学生理解能力有限的情况下，给教与学带来了一定困难，当然也严重影响了教学质量和教学目标实现，这显然不能适应学校定位特色。

本书包含绪论、力学实验和热学实验，是根据《高等学校应用物理学本科指导性专业规范》中物理实验知识体系而编写的，属于基础物理实验。本书共有 21 个实验，其中有 13 个力学实验，8 个热学实验。绪论部分主要介绍基本物理实验方法、基本物理量、常用实验数据处理方法等，突出应用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。本书可作为高等学校本科物理学及相近专业第一层次物理实验课和本科非物理学理工类专业大学物理实验课的教材。除此之外，本书尽可能简化实验原理、突出实验数据记录和处理上的详细化，让 80% 的学生在规定的实验时间内能完成实验，基础较薄弱的少数学生即使在看不明白原理的情况下，按照实验内容和步骤，在本书数据记录、数据处理的“引导”下也能完成实验，减少学生设计实验数据、记录表格等环节所需的时间，同时使数据记录和处理更规范、更准确。

本书主要由钦州学院理学院物理教研室从事物理实验教学的教师编写，具体编写任务如下：周小珠，负责热学实验部分的编写；谢冰，负责统稿、审核和数据处理方法的编写；吴

兹起，负责力学实验部分的编写；黄天宇，负责绪论部分的编写；张爽，负责计算机通用软件处理实验数据部分的编写。

由于作者水平有限，书中难免出现错误与不妥之处，敬请有关专家和读者批评指正。

编 者

2018 年 1 月

# 目 录

绪 论	1
§ 1 物理实验的基础知识	1
§ 1-1 物理实验课的任务与教学环节	1
§ 1-2 测量与误差	3
§ 1-3 有效数字及其运算规则	5
§ 1-4 测量的不确定度	8
§ 1-5 数据处理的一般方法	12
§ 2 力学、热学实验基本仪器	17
§ 2-1 游标卡尺	17
§ 2-2 螺旋测微计	19
§ 2-3 物理天平	20
力学实验部分	22
实验一 速度、加速度的测定	22
实验二 动量守恒的验证	25
实验三 用三线摆测量刚体转动惯量	28
实验四 拉伸法测定杨氏模量	34
实验五 固体和液体的密度测定	40
实验六 受迫振动	43
实验七 弦振动实验	49
实验八 声速的测量	53
实验九 双孔应变传感器——称重实验	57
实验十 集成霍尔传感器特性与简谐振动实验	58
实验十一 用单摆测重力加速度	65
实验十二 信号的傅里叶分析	67
实验十三 耦合摆的研究	70
热学实验部分	75
实验十四 固体比热容的测定（混合法）	75
实验十五 冰熔解热的测量	80
实验十六 水的汽化热的测定	83
实验十七 金属丝的线膨胀系数的测量	85

实验十八 稳态平板法测量非良导体的导热系数·····	88
实验十九 用落球法测液体的粘度·····	91
实验二十 中、高真空的获得与测量·····	93
实验二十一 温度传感器及其标定和应用·····	99
附录 A 中华人民共和国法定计量单位·····	103
附录 B 常用物理常数表·····	105
附录 C 常用物理常量表·····	106
参考文献·····	112

# 绪 论

## §1 物理实验的基础知识

### §1-1 物理实验课的任务与教学环节

#### 一、物理实验课的任务

物理学是一门实验科学，物理学的形成和发展是以实验为基础的，物理实验的重要性不仅表现在通过实验发现物理定律，而且物理学中的每一项重要突破都与实验密切相关。历史表明，在物理学的建立和发展过程中，物理实验一直起着重要的作用，并且在今后探索和开拓新的科技领域时，物理实验仍然是强有力的工具。物理实验课是理工科大学学生进行科学实验基础训练的一门重要课程，是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端，是大学生今后从事科学研究工作的启蒙，它的主要任务如下。

(1) 学习物理实验的基本知识、基本方法，培养实验技能。实验技能包括：通过阅读教材或其他资料，能概括出实验原理和方法要点；正确使用实验仪器，掌握基本物理量的测量方法和实验技能；能记录和处理实验数据，分析实验结果和撰写实验报告。

(2) 对物理实验现象的观测和分析，学习运用理论指导实验、分析和解决实验中出现的的问题，从理论和实际的结合上加深对物理概念与规律的理解。

(3) 通过设计性实验的实践训练，学习并初步掌握物理实验基本设计方法。

(4) 通过实验，培养良好的实验习惯，严谨、细致、实事求是的科学态度和工作作风。

#### 二、物理实验课的教学环节

物理实验是学生在老师指导下独立进行实验的一种实践活动，但是无论实验的内容如何，也无论采用何种实验方法，其基本程序大致相同，一般都有三个环节。

##### 1. 课前预习

要在规定的时间内高质量地完成实验任务，必须在实验之前做好充分的预习工作，只有这样，才能掌握实验工作的主动性，自觉地、创造性地获得知识，否则，就只能机械地、盲目地照搬实验教材，更谈不上理解物理现象的实质、分析实验中的各种现象了。

预习时应仔细阅读实验教材或有关的资料。在理解本次实验的目的、原理的基础上，弄清楚要观察哪些现象，测量哪些物理量，以及用什么方法和仪器来测定，同时写出预习报告。预习报告应包括：画出实验原理图，列出实验所依据的理论公式，画出数据记录表格。表格上应标明文字符号所代表的物理量及其单位，并确定测量次数。

## 2. 进行实验

实验是整个教学中最重要的一环，动手能力、分析问题和解决问题的能力培养，主要在具体实验时完成。因此，必须充分利用课内的有限时间，提高学习效率。

（1）仪器的安装与调节：实验前要熟悉仪器，了解仪器的工作原理和用法，然后耐心地将仪器安装调整好。不注意耐心细致地调整仪器，而忙于进行测量，这是很多同学容易出现毛病。使用仪器测量时，必须按规程进行操作。在仪器的安装与调整中一般应注意：

① 安排仪器时，应尽量做到便于观察、读数和记录。

② 灵敏度高的仪器（如物理天平、灵敏电流计）都有制动器，不进行测量时，应使仪器处于制动状态。

③ 停表、温度计、放大镜等小件仪器，在用完之后要放到实验台中间的仪器盒中。

④ 拧动仪器上的旋钮或转动部分时，不要用力过猛。

⑤ 注意仪器的零点，必要时需进行调零。

⑥ 砝码、透镜、表面镀膜反射镜等器件，为了保持其测量精确度和光洁，不许用手去摸，也不要随便用布去擦。

⑦ 使用电学仪器要注意电源电压、极性，并需经教师允许后方能接通电源。

⑧ 实验后要将仪器整理、恢复到实验前的状态。

（2）观测：实验中必须仔细观察、积极思考、认真操作、防止急躁。要在实验所具备的客观条件（如温度、压力、仪器精度等）下，进行认真的实事求是的观察和测量。

（3）记录：每次测量后，应及时将实验数据细心地记录在预习报告的数据表格内，并注明单位。要根据仪表的最小刻度单位或准确度等级决定实验数据的有效数字的位数。记录时要用钢笔或圆珠笔，不要用铅笔。如果发现记错了，也不要涂改，应轻轻画上一道，在旁边写上正确值，使正误数据都能清晰可辨，以供在分析测量结果和误差时参考。此外，还应记录环境温度、湿度、气压等实验条件，仪器型号规格与编号及实验现象等。

总之，测量实验数据时要特别仔细，以保证读数准确，因为实验数据的优劣往往决定了实验结果的成败。

## 3. 写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结，要求文字通顺，字迹端正，图表规矩，结论明确，逐步培养以书面形式分析、总结科学实验结果的能力。实验报告内容包括以下几部分。

（1）实验名称、实验者姓名、实验日期、实验地点、指导老师。

（2）实验目的。

（3）仪器和用具：应注明所用仪器的规格、精度或分度值。



(4) 实验原理：用自己的语言简要叙述实验原理，列出测量中依据的主要公式、电路图、光路图。

(5) 实验内容与步骤：根据实际的实验过程，条理分明地写出实验步骤及安全注意要点，可参考书上的步骤，但不要照抄。

(6) 数据记录与处理：对实验中记录的“原始数据”重新列表整理，根据实验要求完成数据计算、图线的绘制等。计算要按照有效数字的运算法则进行，并求出结果的不确定度，正确运用不确定度表示实验结果。在表达实验结果时，一般包括不可分割的两部分，即结果的测量值  $\bar{x}$ ，测量不确定度  $u(x)$ ，结果写为  $x = \bar{x} + u(x)$ ， $E = \frac{u(x)}{\bar{x}} \times 100\%$ 。

(7) 结果及讨论：该部分要明确给出实验结果，并对结果进行讨论（如实验中观察到的现象分析、误差来源分析、实验中存在的问题讨论、回答实验思考题等）。也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见。

## §1-2 测量与误差

### 一、测量

物理实验是以测量为基础的，研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量。测量可以分为两类。

根据测量方法，可分为直接测量和间接测量。直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果。如用米尺测量物体的长度、用天平称量物体的质量、用电流表测量电流等，都是直接测量。间接测量是借助函数关系由直接测量的结果计算出待测的物理量。例如，测量地球表面的重力加速度时，可以测量单摆的摆长和周期并根据单摆周期的公式计算得出；测量电阻  $R$  时，可以通过测量流过被测电阻的电流强度和电阻两端的电压并根据欧姆定律求出该电阻的阻值。这一类测量称为间接测量。

根据测量条件，可分为等精度测量和非等精度测量。等精度测量是指在同一（相同）条件下进行的多次重复的测量，如同一个人，用同一台仪器，每次测量时周围环境条件相同，等精度测量每次测量的可靠程度相同，这样的一组数据称为测量列。反之，若每次测量时的条件不同，或测量仪器改变，或测量方法、条件改变，这样所进行的一系列测量称为非等精度测量。非等精度测量的结果，其可靠程度自然也不相同。在物理实验中，凡是要求对待测量进行多次测量的均指等精度测量，本书中有关测量误差与数据处理的讨论，都是以等精度测量为前提的。

测量结果给出被测量的量值，它包括两部分，数值和单位（不标出单位的数值不能是量值）。

## 二、误差

实践表明，测量结果都存在误差，误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程中。这是因为测量仪器、方法、环境及实验者等都不可能完美无缺。分析测量中可能产生的各种误差并尽可能消除或减小其影响，对测量结果中未能消除的误差做出合理估计，是实验的重要内容。

### 1. 常用误差概念

每一个物理量都是客观存在的，在一定的条件下具有不以人的意志为转移的固定大小，这个客观大小称为该物理量的真值。进行测量是想要获得待测量的真值，但是测量是依据一定的理论或方法，使用一定的仪器，在一定的环境中，由一定的人进行的，而由于实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、环境的不稳定性等因素的影响，待测量的真值是不可能测得的，测量结果和被测量真值之间总会存在或多或少的偏差，这种偏差就称为测量误差。

设被测量的真值为  $x_0$ ，测得值为  $x$ ，误差为  $\Delta x$ ，则

$$\Delta x = x - x_0 \quad (0-1)$$

此式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小的方向，因此又称  $\Delta x$  为绝对误差。

绝对误差可以表示某一测量结果的优劣，但在比较不同测量结果时则不适用，需要用相对误差  $E$  表示。相对误差定义为测量的绝对误差与真值之比，一般用百分比来表示，即

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (0-2)$$

由于客观条件、人们认识的局限性，测量不可能获得待测量的真值，通常用约定真值（一近似的相对真值）代替真值，也称测量的最佳值。在实际应用中，对单次测量可直接将测量结果当成约定真值，对多次测量将其算术平均值当成约定真值。为了估计误差，定义测量值与约定真值的差值为偏差，偏差又叫做“残差”。实验中真值是得不到的，因此误差也无法知道，而测量的偏差可以准确知道，实验误差分析中要经常计算这种偏差，用偏差来描述测量结果的精确程度。

由于误差存在于一切科学实验和测量过程的始终，因此分析测量中可能产生的各种误差，尽可能消除其影响，并对最后结果中未能消除的误差做出估计，就是物理实验中不可缺少的工作。为此必须研究误差的性质、来源，以便采取适当的措施，以期达到最好结果。

### 2. 误差的分类

测量误差根据其性质和来源可分为系统误差和随机误差两大类。

#### (1) 系统误差

在同一条件下（测量方法、仪器、环境和观测人不变）多次测量同一量时，符号和绝对值保持不变的误差，或按某一确定的规律变化的误差，称为系统误差。系统误差的来源有以下几个方面：①仪器误差：是由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差；②理论误差：是由于测量所依据的理论公式本身的近似性，或实验条件不能达到理论公式所规定的要求，或测量方法等所带来的误差；③观测误差：是由于观测者本人生理或心理特点造成的误差。

例如,用“落球法”测量重力加速度,由于空气阻力的影响,多次测量的结果总是偏小,这是测量方法不完善造成的误差;用停表测量运动物体通过某一段路程所需要的时间,若停表走时太快,即使测量多次,测量的时间 $t$ 总是偏大为一个固定的数值,这是仪器不准确造成的误差;在测量过程中,若环境温度升高或降低,使测量值按一定规律变化,是由于环境因素变化引起的误差。

系统误差一般应通过校准测量仪器、改进实验装置和实验方案、对测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减小。发现并消除或减小系统误差通常是一件困难的任务,需要对整个实验所依据的原理、方法、仪器和步骤等可能引起误差的各种因素进行分析。实验结果是否正确,往往在于系统误差是否已被发现和尽可能消除,因此对系统误差不能轻易放过。

## (2) 随机误差

在实际测量条件下,多次测量同一量时,误差的绝对值符号的变化,时大时小、时正时负,以不可预定方式变化着的误差叫做随机误差,也叫做偶然误差。引起随机误差的原因有很多。仪器精密度与观察者感官灵敏度有关。如仪器显示数值的估计读数位偏大和偏小;仪器调节平衡时,平衡点确定不准;测量环境扰动变化及其他不能预测、不能控制的因素,如空间电磁场的干扰、电源电压波动引起测量的变化等。

在少量测量数据中,它的取值不具有规律性,当测量次数很多时,随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明,随机误差服从一定的统计规律(正态分布),其特点是:绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大(单峰性);绝对值相等的正负误差出现的概率相同(对称性);绝对值很大的误差出现的概率趋于零(有界性);误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零(抵偿性)。因此,增加测量次数可以减小随机误差,但不能完全消除。

实验中,精密度高是指随机误差小,而数据很集中;准确度高是指系统误差小,测量的平均值偏离真值小;精确度高是指测量的精密度和准确度都高,数据集中而且偏离真值小,即随机误差和系统误差都小。

由于测量者的过失,如实验方法不合理、用错仪器、操作不当、读错数值或记错数据等引起的误差,是一种人为的过失误差,不属于测量误差,只要测量者采用严肃认真的态度,过失误差是可以避免的。

## §1-3 有效数字及其运算规则

### 一、有效数字的定义及其基本性质

在实验中所测得的被测量都是含有误差的数值,那么这个数值就不应当无止境地写下去,写多了没有实际意义,写少了又不能比较真实地表达物理量。因此,一个物理量的数值和数学上的某一个数就有不同的意义,这就引入了一个有效数字的概念。从仪器上读出的数字,通常都要尽可能估计到仪器最小刻度线的下一位。这最后一位数是有疑问的,称为可疑数字,

其余的是准确数字，称为可靠数字。由此定义：测量结果中所有可靠数字加上末位的可疑数字统称为测量结果的有效数字。例如，用最小分度值为 1mm 的米尺测量物体的长度，读数值为 7.28cm。其中 7 和 2 这两个数字是从米尺的刻度上准确读出的，即为可靠数字。末尾数字 8 是在米尺最小分度值的下一位上估计出来的，是不准确的，即为可疑数字，测量结果应当而且也只能保留一位可疑数字。有效数字的个数叫做有效数字的位数，如上述的 7.28cm 称为三位有效数字。

书写有效数字时必须注意“0”的位置。仪器上显示的最后一位数是“0”时，此“0”也是有效数字，也要读出并记录。例如，用一毫米分度尺测得一物体的长度为 5.30cm，它表示物体的末端是和分度线“3”刚好对齐，下一位是 0，这时若写成 5.3cm 则不能肯定这一点。所以此“0”是有效数字，必须记录。另外，在记录时，由于选择单位的不同，也会出现一些“0”，例如，5.30cm 也可记为 0.0530m，这是由于单位变换才出现的“0”，没有反映出测量大小的信息，不能认为是有效数字。显然，在有效数字的位数确定时，第一个不为零的数字左面的零不能算有效数字的位数，而第一个不为零的数字右面的零一定要算做有效数字的位数。如 0.0135m 是三位有效数字，1.030m 是四位有效数字。另外，单位换算时有效数字的位数不应发生变化。例如，重力加速度  $980\text{cm/s}^2$ 、 $9.80\text{m/s}^2$  或  $0.00980\text{km/s}^2$  都是三位有效数字。也就是说，采用不同单位时，小数点的位置移动会使测量值的数值大小不同，但测量值的有效数字位数不变。

在物理实验中通常采用科学计数法记录数据，即任何数值都只写出有效数字，且通常在小数点前只保留一位整数，而数量级则用 10 的  $n$  次幂的形式来表示，如 0.0530m 可写成  $5.30 \times 10^{-2}\text{m}$ 。

从有效数字的另一面也可以看出测量用具的最小刻度值，如 0.0135m 是用最小刻度为毫米的尺子测量的，而 1.030m 是用最小刻度为厘米的尺子测量的。但是有些仪器，如数字式仪表或游标卡尺，是不可能估计出最小刻度以下一位数字的，那么我们的读数办法是：把直接读出的数字记录下来，仍然认为最后一位是存疑的，因为在数字式仪表中，最后一位总有  $\pm 1$  的误差。游标卡尺的情况也是如此。

## 二、有效数字的运算规则

由于测量误差的存在，直接测得的数据只能是近似数，通过这些近似数求得的间接测量值也是近似数。几个近似数的运算可能会增大误差。为了不因计算而引进误差，同时为了使运算更简洁，对有效数字的运算做如下规定。

### 1. 实验后计算误差时，根据误差确定有效数字是正确决定有效数字的基本依据

误差只取一位或二位有效数字，测量值的数值的有效数字是到误差末位为止，即测量值有效数字的末位和误差末位取齐，例如，用单摆测得某地重力加速度为

$$g = (981.2 \pm 0.8) \text{ cm/s}^2$$

误差只取一位，测量值的有效数字的末位是和误差同一位的 2。

## 2. 实验后不计算误差时, 测量结果有效数字位数只能按以下的规则粗略确定

### (1) 加减运算

若干数进行加法或减法运算, 其和或者差的结果的欠准确数字的位置和参与运算各量中的欠准确数字的位置最高者相同。即加减运算后的末位, 应当和参加运算各数中最先出现的可疑位一致。例如:

$$32.\underline{1}+3.27\ \underline{6}=35.\underline{37}\ \underline{6}=35.\underline{4} \quad 26.\underline{65}-3.92\ \underline{6}=22.\underline{72}\ \underline{4}=22.7\ \underline{2}$$

### (2) 乘除运算

乘除运算后的有效数字位数, 可估计为和参与运算各数中有效数字位数最少的相同。例如:

$$834.\underline{5} \times 23.\underline{9} = 19\ 944.\underline{55} = 1.99 \times 10^4 \text{ (三位)}$$

### (3) 其他运算

乘方、开方的有效数字与原数的有效数字位数相同。以  $e$  为底的自然对数, 计算结果的小数点后面的位数与原数的有效数字位数相同, 如  $\ln 56.7 = 4.038$  (结果的小数点后取三位)。以 10 为底的常用对数, 计算结果的有效数字位数比  $\lg x$  的结果多取一位。

指数 (包括  $10^x$ 、 $e^x$ ) 函数运算后的有效数字的位数可取比指数的小数点后的位数多一位, 如  $e^{9.24} = 1.03 \times 10^4$  (指数上的小数点后有两位, 计算结果的有效数字为三位)。

对三角函数, 一般角度的不确定度分别为  $1'$ 、 $10''$ 、 $1''$ , 有效数字位数分别取四、五、六位。

### (4) 有效数字的修约

根据有效数字的运算规则, 为使计算简化, 在不影响最后结果应保留有效数字的位数 (或欠准确数字的位置) 的前提下, 可以在运算前、后对数据进行修约, 其修约原则是“四舍六入五看右左”。“五看右左”即为五时则看五后面, 若为非零的数则入, 若为零则往左看, 拟留数的末位数为奇数则入, 为偶数则舍, 这一说法可以简述为“五看右左”。

例: 将下列数保留三位小数

$$2.143\ 50 \rightarrow 2.144$$

$$2.144\ 50 \rightarrow 2.144$$

$$2.144\ 51 \rightarrow 2.145$$

### (5) 使用有效数字规则时注意

① 对参与运算的一些特殊的准确数或常数, 如倍数 2、测量次数  $n$ 、常数  $\pi$ 、 $e$  等, 2、 $n$  没有可疑成分, 不受有效数字运算规则限制;  $\pi$ 、 $e$  等常数的有效数字位数可任意取, 一般与被测量的有效数字位数相同。

② 有多个数值参加运算时, 在运算中途应比按有效数字运算规则规定的多保留一位, 以防止由于多次取舍引入计算误差, 但运算最后仍应舍去, 例如:

$$3.144 \times (3.615^2 - 2.684^2) \times 12.39 = 3.144 \times (13.06\ \underline{8} - 7.203\ \underline{9}) \times 12.39 = 3.144 \times 5.86\ \underline{4} \times 12.39 = 228$$

带横线的数字不是有效数字，运算过程中保留它，是为了减少舍入误差，这样的数称为安全数字。

## §1-4 测量的不确定度

自从国际计量局（BIPM）在《实验不确定度的规定的建议书 INC（1980）》中提出使用“不确定度”（uncertainty）表示实验结果的误差后，世界各国已普遍采纳，我国在从 1992 年 10 月开始实施的《测量误差和数据处理技术规范》中，也规定了使用不确定度评定测量结果的误差。

### 一、不确定度的概念

不确定度是表征测量结果具有分散性的一个参数，它是被测物理量的真值在某个量值范围内的一个评定。或者说，它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度。不确定度反映可能存在的误差范围，即随机误差分量和未定系统误差分量的联合分布范围。

不确定度是建立在误差理论基础上的一个新概念，是误差的数字指标，它表示由于测量误差的存在而对被测值不能肯定的程度，即测量结果不能肯定的误差范围，每个测量结果总存在着不确定度，作为一个完整的测量结果不仅要标明其量值大小，还要标出测量不确定度，以表明该测量结果的可信赖程度。

按误差理论的高斯分布可知：

$(\bar{x} - u(x)) \sim (\bar{x} + u(x))$  范围包含真值的概率为 68%；

$(\bar{x} - 1.96u(x)) \sim (\bar{x} + 1.96u(x))$  范围包含真值的概率为 95%；

$(\bar{x} - 2.58u(x)) \sim (\bar{x} + 2.58u(x))$  范围包含真值的概率为 99%。

由于误差来源众多，测量结果不确定度一般包含几个分量，为了估算方便，按估计其数值的不同方法，它可以分为 A、B 两类分量。

#### 1. A 类不确定度 $u_A(x)$

A 类分量等于用统计方法计算出的标准偏差，即 A 类不确定度  $u_A(x)$  就取为平均值的标准偏差：

$$u_A(x) = s(\bar{x}) = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / [n(n-1)]} \quad (0-3)$$

这一公式称为贝塞尔公式。

#### 2. B 类不确定度 $u_B(x)$

对于不能用统计方法评定，而用非统计方法评定测量结果的不确定度就是 B 类不确定度，用符号  $u_B(x)$  表示。

标准不确定度的 B 类评定可有几种不同的情况，有的计量器具在说明书上注明，有的可

以从国家有关标准中查出其允许误差,有的则参照仪器的最小分度值去确定其极限误差。一般认为仪器误差服从均匀分布,其极限误差为  $\Delta$ , 则其标准差为  $\Delta/\sqrt{3}$ , 故其 B 类不确定度  $u_B(x)$  为

$$u_B(x) = \Delta/\sqrt{3} \quad (0-4)$$

关于 B 类不确定度  $u_B(x)$  的评定, 还有其他不服从均匀分布的问题, 在我们的实验里均用式 (0-4) 处理。

### 3. 合成不确定度 $u_c(x)$

对于测量结果的不确定度, 应将 A、B 类分量合成, 即  $u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}$ 。

对直接测量量: 设被测量的不确定度来源有  $k$  项, 不论 A 类或 B 类, 都是等价的, 按方和根去合成, 即其合成不确定度  $u_c(x)$  为

$$u_c(x) = \sqrt{\sum_i^k u^2(x_i)} \quad (0-5)$$

对间接测量量: 设  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ , 各直接测量结果为:

$\bar{x}_1 \pm u_c(\bar{x}_1), \bar{x}_2 \pm u_c(\bar{x}_2), \dots$ , 则间接测量的结果  $y = \bar{y} \pm u_c(\bar{y})$ , 其中其合成不确定度  $u_c(\bar{y})$  为

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (0-6)$$

假设间接测量量为  $N = f(x, y, \dots)$ , 则其合成不确定度  $u_c(\bar{N})$  可套用标准误差传递公式进行估算, 则不确定度传递公式如表 0-1 所示。

表 0-1 不确定度传递公式

函数表达式	测量不确定度传递公式
$N = x \pm y$	$u_c(\bar{N}) = \sqrt{u_c^2(\bar{x}) + u_c^2(\bar{y})}$
$N = x \cdot y$ 或 $\frac{x}{y}$	$\frac{u_c(\bar{N})}{\bar{N}} = \sqrt{\left[ \frac{u_c(\bar{x})}{\bar{x}} \right]^2 + \left[ \frac{u_c(\bar{y})}{\bar{y}} \right]^2}$
$N = kx$	$u_c(\bar{N}) =  k  u_c(\bar{x}); \frac{u_c(\bar{N})}{\bar{N}} = \frac{u_c(\bar{x})}{\bar{x}}$
$N = x^n$	$\frac{u_c(\bar{N})}{\bar{N}} = n \cdot \frac{u_c(\bar{x})}{\bar{x}}$
$N = \sqrt[n]{x}$	$\frac{u_c(\bar{N})}{\bar{N}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{u_c(\bar{x})}{\bar{x}}$
$N = \frac{x^p y^q}{z^r}$	$\frac{u_c(\bar{N})}{\bar{N}} = \sqrt{p^2 \left[ \frac{u_c(\bar{x})}{\bar{x}} \right]^2 + q^2 \left[ \frac{u_c(\bar{y})}{\bar{y}} \right]^2 + r^2 \left[ \frac{u_c(\bar{z})}{\bar{z}} \right]^2}$
$N = \sin x$	$u(N) =  \cos x  \cdot u(x)$
$N = \ln x$	$u(N) = \frac{u(x)}{x}$

## 二、测量结果有效数字取舍原则

不确定度一般保留 1~2 位有效数字，当首位数字等于或大于 3 时，取一位；小于 3 时，取两位，其后面的数字采用进位法舍去。例如，计算结果得到不确定度为  $0.2414 \times 10^{-3} \text{ m}$ ，则应取  $u = 0.25 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

测得值取几位，由不确定度来决定。测得值的保留位数与不确定度的保留位数相同，也就是说，测得值有效数字的末位和不确定度末位取齐。例如，用单摆测得某地重力加速度为

$$g = (979.2 \pm 0.6) \text{ cm/s}^2$$

【例 0-1】使用 0~25mm 的一级螺旋测微计  $\Delta = 0.004 \text{ mm}$  测量钢球的直径  $d$ （同一方位），测得的数据如表 0-2 所示，求测量的结果  $(\bar{d} \pm u_c(\bar{d})) \text{ mm}$ 。

表 0-2 测量钢球直径的实验数据表

测量序号	读数 $x_1 / \text{mm}$	未读数 $x_2 / \text{mm}$	直径 $d = (x_2 - x_1) / \text{mm}$
1	0.004	6.002	5.998
2	0.003	6.000	5.997
3	0.004	6.000	5.996
4	0.004	6.001	5.997
5	0.005	6.001	5.996
6	0.004	6.001	5.996
7	0.004	6.001	5.997
8	0.003	6.002	5.999
9	0.005	6.000	5.995
10	0.004	6.000	5.996

解 由实验数据可算出直径的算术平均值  $\bar{d} = 5.9967 \text{ mm}$ ，A 类不确定度为

$$u_A(\bar{d}) = \frac{s(d)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} = 0.0037 \text{ mm}$$

仪器误差为均匀分布  $\Delta = 0.004 \text{ mm}$ ，故 B 类不确定度为

$$u_B(x) = \Delta / \sqrt{3} = 0.00231 \text{ mm}$$

合成不确定度为

$$u_c(\bar{d}) = \sqrt{u_A^2(\bar{d}) + u_B^2(d)} = 0.00436 \text{ mm}$$



取 0.0044mm，测量结果为

$$d = (\bar{d} \pm u_c(\bar{d})) = (5.997 \pm 0.005)\text{mm}$$

相对不确定度

$$E = \frac{u_c(\bar{d})}{\bar{d}} \times 100\% = \frac{0.005}{5.997} \times 100\% = 0.083\%$$

【例 0-2】在单摆法测定重力加速度实验中，测得周期  $T = (2.014 \pm 0.003)\text{s}$ ，摆长  $L = (1.002 \pm 0.002)\text{m}$ 。计算重力加速度  $\bar{g} \pm u_c(g)$ 。

$$\text{解 } \bar{g} = \frac{4\pi^2 \bar{L}}{\bar{T}^2} = \frac{4 \times 3.14^2 \times 1.002}{2.014^2} = 9.7424 \text{m/s}^2$$

$$u_c^2(g) = \left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 u_c^2(L) + \left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)^2 u_c^2(T)$$

$$\text{式中, } \frac{\partial f}{\partial L} = \frac{4\pi^2}{T^2}, \quad \frac{\partial f}{\partial T} = -\frac{8\pi^2 L}{T^3}。$$

代入各数据得

$$u(\bar{g}) = 3.50 \times 10^{-2} \text{m/s}^2 = 0.035 \text{m/s}^2 \approx 0.04 \text{m/s}^2$$

重力加速度测得结果为

$$g = \bar{g} \pm u(\bar{g}) = (9.74 \pm 0.04) \text{m/s}^2$$

$$E = \frac{0.04}{9.75} \times 100\% = 0.4\%$$

【例 0-3】在用双棱镜测量光波波长的实验中， $d_1$ 、 $d_2$ 、 $\Delta x$  均由精度为 0.01mm 的测微目镜测出， $D$  由米尺测量。 $\bar{d}_1 = 2.713\text{mm}$ ， $s(\bar{d}_1) = 0.021\text{mm}$ ， $D = 737.1\text{mm}$ ， $n = 10$ ， $\bar{d}_2 = 0.711\text{mm}$ ， $s(\bar{d}_2) = 0.002\text{mm}$ ， $\bar{\Delta x} = 3.168\text{mm}$ ， $s(\bar{\Delta x}) = 0.010\text{mm}$ 。

$$\text{解 因为 } \lambda = \frac{\sqrt{d_1 d_2} \Delta x}{D n}$$

由式 (0-6) 可得

$$u_c^2(\lambda) = \left(\frac{\partial \lambda}{\partial d_1}\right)^2 u_c^2(d_1) + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial d_2}\right)^2 u_c^2(d_2) + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial D}\right)^2 u_c^2(D) + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \Delta x}\right)^2 u_c^2(\Delta x)$$

整理后得

$$u_c(\lambda) = \lambda \left[ \left(\frac{1}{2d_1}\right)^2 u_c^2(d_1) + \left(\frac{1}{2d_2}\right)^2 u_c^2(d_2) + \left(\frac{1}{D}\right)^2 u_c^2(D) + \left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 u_c^2(\Delta x) \right]^{1/2}$$

其中：

(1)  $d_1$  的 A 类不确定度  $u_A(\bar{d}_1) = s(\bar{d}_1) = 0.021\text{mm}$  ,  $d_1$  的 B 类不确定度  $u_B(\bar{d}_1) = 0.01\text{mm}/\sqrt{3} = 0.0058\text{mm}$  , 则  $u_c(d_1) = \sqrt{u_A^2(d_1) + u_B^2(d_1)} = \sqrt{0.021^2 + 0.0058^2} = 0.022\text{mm}$  。

(2) 同理,  $d_2$  的 A 类不确定度  $u_A(\bar{d}_2) = s(\bar{d}_2) = 0.002\text{mm}$  ,  $d_2$  的 B 类不确定度  $u_B(\bar{d}_2) = 0.01\text{mm}/\sqrt{3} = 0.0058\text{mm}$  , 则  $u_c(d_2) = \sqrt{u_A^2(d_2) + u_B^2(d_2)} = \sqrt{0.002^2 + 0.0058^2} = 0.0061\text{mm}$  。

(3)  $\Delta x$  的 A 类不确定度  $u_A(\Delta x) = s(\Delta x) = 0.010\text{mm}$  ,  $\Delta x$  的 B 类不确定度  $u_B(\Delta x) = 0.01\text{mm}/\sqrt{3} = 0.0058\text{mm}$  , 则  $u_c(\Delta x) = \sqrt{u_A^2(\Delta x) + u_B^2(\Delta x)} = \sqrt{0.010^2 + 0.0058^2} = 0.012\text{mm}$  。

(4)  $D$  的 A 类不确定度  $u_A(D) = 0$  ,  $D$  的 B 类不确定度  $u_B(D) = 1\text{mm}/\sqrt{3} = 0.58\text{mm}$  , 代入各数据可计算  $u_c(\lambda)$  。

## §1-5 数据处理的一般方法

在做完实验后, 需要对实验中测量的数据进行计算、分析和整理, 进行去粗取精、去伪存真的工作, 从中得到最终的结论, 找出实验的规律, 这一过程称为数据处理。实验数据处理是实验工作中一个不可缺少的部分, 下面介绍实验数据处理常用的几种方法。

### 一、列表法

列表法就是将一组实验数据中的自变量的各数值依照一定的形式和顺序列成表格, 或将任一组测量结果的多次测量值列成一张适当的表格, 以提高处理数据的效率, 减少和避免错误, 避免不必要的重复计算, 利于计算和分析误差。列表时要遵循下列原则:

(1) 简单明了, 分类清楚, 便于看出数据间的关系, 便于归纳处理。

(2) 在表格上方写上表格名称, 在表内标题栏中注明物理量名称和单位, 不要把单位写在数字后。

(3) 数据应正确反映测量结果的有效数字。

(4) 记录数据必须实事求是, 切忌伪造或随意修改。

例如, 用伏安法测量线性电阻时, 得到的实验数据及运算结果如表 0-3 所示。

表 0-3 伏安法测量线性电阻时的实验数据

$U/\text{V}$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	平均
$I/\text{mA}$	0.50	1.02	1.49	2.05	2.51	2.98	
$R/\Omega$	2 000.0	1 960.8	2 013.4	1 951.2	1 992.0	2 013.4	

### 二、作图法

实验所揭示的物理量之间的关系, 可以用函数关系式来表示, 也可以用几何图线来直观地表示。作图法就是在坐标纸上描绘出一系列数据间的对应关系, 再寻找与图线对应的函数形式, 通过图解方法确定函数表达式——经验公式。作图法是科学实验中最常用的一

种数据处理方法。为了使图线能清楚地、定量地反映出物理现象的变化规律，并能准确地从图线上确定物理量值的关系，所作的图应符合准确度要求，并要遵循一定的规则。作图规则如下。

(1) 作图必须用坐标纸。

(2) 坐标纸的最小分格应与实验数据的最后一位准确数字相当，图形的大小和位置应适当（横轴与纵轴交点的标度值不一定是零）。

(3) 要标出坐标轴所代表的物理量的名称（或符号）和单位，标明分度值。

(4) 描点和连线。根据测量数据，用削尖的铅笔在坐标图纸上用“+”或“×”标出各测量点，使各测量数据坐落在“+”或“×”的交叉点上。同一图上的不同曲线应当用不同的符号，如“×”、“+”、“○”、“△”、“□”等。连线要成光滑的曲线或直线，不应强求通过每一个实验点，但应使曲线两旁的点分布均匀。

(5) 在图下方写上图名，所标文字应当用仿宋体。

(6) 在实验中，许多函数关系可以通过适当的变换得到线性关系，即可把曲线改为直线，称为曲线改直。

例如，玻-玛定律  $PV = C$  是个双曲线，图很不容易作好。但如以  $P$  为纵轴， $1/V$  为横轴，作图为直线，斜率即为  $C$ ，则很容易作出实验图形。

又如，对匀加速直线运动有  $s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ ，式中  $a$ 、 $v_0$ 、 $s_0$  为常数。 $s$  与  $t$  的关系为一条抛物线，若将函数改写为  $s = \frac{1}{2} a \left( t + \frac{v_0}{a} \right)^2 + \left( s_0 - \frac{v_0^2}{2a} \right)$ ，作  $s - \left( t + \frac{v_0}{a} \right)^2$  函数图，则得到一条直线，其斜率为  $\frac{1}{2} a$ ，截距为  $s_0 - \frac{v_0^2}{2a}$ 。

表 0-4 列出了几种常用的曲线改直线函数关系。

表 0-4 几种常用的曲线改直线函数关系

函数	坐标	斜率	截距	坐标系
$y = \frac{a}{x}$	$y - \frac{1}{x}$	$a$	0	直角
$y = ax^2 + b$	$y - x^2$	$a$	$B$	直角
$y = a\sqrt{x} + b$	$y - \sqrt{x}$	$a$	$B$	直角
$y = a^x b$	$\lg y - x$	$\lg a$	$\lg b$	单对数
$y = ax^b$	$\lg y - \lg x$	$b$	$\lg a$	双对数

### 三、逐差法

当两物理量的函数关系满足多项式的形式，自变量  $x$  等间距变化时，常用逐差法来处理数据。这种方法的优点是既能充分利用实验数据，又具有减小误差的效果。这里仅讨论一次逐差法，即线性函数的逐差法。具体做法是将测量得到的偶数组数据分成前后两组，将对应项分别相减，然后再求平均值。

例如，在弹性限度内，弹簧的伸长量  $x$  与所受的载荷（拉力） $F$  之间满足线性关系  $F=kx$ ，实验时等差地改变载荷，测得一组实验数据如表 0-5 所示。

表 0-5 研究弹簧伸长量的实验数据

砝码质量/kg	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000
弹簧伸长位置/cm	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$

求每增加 1kg 砝码弹簧的平均伸长量  $\Delta x$ 。

若不加思考地进行逐项相减，很自然会采用下列公式计算

$$\Delta x = \frac{1}{7}[(x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) + \cdots + (x_8 - x_7)] = \frac{1}{7}(x_8 - x_1)$$

结果发现除  $x_1$  和  $x_8$  外，其他中间测量值都未用上，它与一次增加 7 个砝码的单次测量等价。若用多项间隔逐差，即将上述数据分成前后两组，前一组  $(x_1, x_2, x_3, x_4)$ ，后一组  $(x_5, x_6, x_7, x_8)$ ，然后对应项相减求平均，即

$$\Delta x = \frac{1}{4 \times 4}[(x_5 - x_1) + (x_6 - x_2) + (x_7 - x_3) + (x_8 - x_4)]$$

这样全部测量数据都用上了，保持了多次测量的优点，减小了随机误差，计算结果比前面的要准确些。逐差法计算简便，特别是在检查具有线性关系的数据时，可随时“逐差验证”，及时发现数据规律或错误数据。

## 四、线性拟合

### 1. 最小二乘法（线性回归）

直线拟合求最佳经验公式的一种数据处理方法是最小二乘法（又称为一元线性回归），它可减小用作图法求直线公式时图线的绘制引入的误差，结果更精确，在科学实验中得到了广泛的应用。

#### （1）最小二乘法的理论基础

若两个物理量  $x$ 、 $y$  满足线性关系，并由实验等精度地测得一组实验数据  $(x_i, y_i) (i=1, 2, \cdots, n)$ ，且假定实验误差主要出现在  $y_i$  上，设拟合直线公式为  $y = f(x)$ ，当所测各  $y_i$  值与拟合直线上各估计值  $f(x_i)$  之间偏差的平方和最小，即  $s = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2$  趋于最小时，所得拟合公式即为最佳经验公式。

#### （2）用最小二乘法求最佳经验公式

设由实验数据  $(x_i, y_i) (i=1, 2, \cdots, n)$  求得最佳经验公式为  $y = a + bx$ ，根据最小二乘法原理，如图 0-1 所示，有

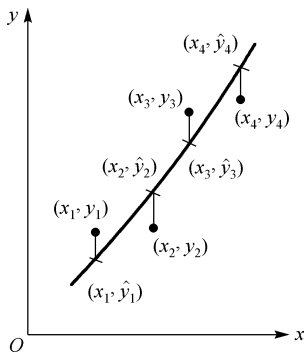


图 0-1  $x$ 、 $y$  的关系

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2$$

使  $S$  为最小的条件是

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial^2 S}{\partial a^2} > 0, \quad \frac{\partial^2 S}{\partial b^2} > 0$$

由一阶微商为零得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a} &= -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} &= -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)x_i = 0 \end{aligned} \right\}$$

解得

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n (x_i y_i) - \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i}{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (0-7)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i - n \sum_{i=1}^n (x_i y_i)}{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (0-8)$$

$$\text{令 } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \bar{x}^2 = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2, \quad \overline{x^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad \overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i y_i), \quad \text{则}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (0-9)$$

$$b = \frac{\bar{x} \cdot \bar{y} - \overline{xy}}{\bar{x}^2 - \overline{x^2}} \quad (0-10)$$

如果实验是在已知  $y$  和  $x$  满足线性关系下进行的, 那么用上述最小二乘法线性拟合 (又称一元线性回归) 可解得斜率  $a$  和截距  $b$ , 从而得出回归方程  $y = a + bx$ 。如果实验要通过对  $x$ 、 $y$  的测量来寻找经验公式, 则还应判断由上述一元线性拟合所确定的线性回归方程是否恰当。这可用下列相关系数  $r$  来判别

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{(\bar{x}^2 - \overline{x^2})(\bar{y}^2 - \overline{y^2})}} \quad (0-11)$$

式中,  $\bar{y}^2 = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2$ ,  $\overline{y^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$ 。 $r$  表示两变量之间的函数关系与线性的符合程度,  $r \in [-1, 1]$ ,  $r$  绝对值越接近于 1,  $x$  和  $y$  的线性关系越好; 如果  $r$  接近于 0, 可以认为  $x$  和  $y$  之

间不存在线性关系。物理实验中  $r$  的绝对值如能达到 0.999 以上（3 个 9 以上），就表示实验数据线性良好。用直线拟合法处理数据时，一定要计算相关系数。

2. 计算机软件拟合法

使用计算机软件对实验数据进行线性拟合，是一种相对准确且便利的方法，学会使用计算机软件对实验数据进行处理分析，也可以为将来的科研工作打下良好的基础。可以对数据进行拟合的软件种类丰富，这里仅以 Excel 软件为例进行线性拟合的操作讲解。

例如，在单摆实验中，由简谐振动的公式  $T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{g}\right)L$  可知，单摆摆动周期的平方与摆长成正比例关系，实验测量得到的数据如表 0-6 所示。

表 0-6 单摆实验数据表

摆长 $L/\text{cm}$	周期 $T/\text{s}$	$T^2/\text{s}^2$
100	2.00	4.00
90	1.91	3.65
80	1.79	3.24
70	1.66	2.76
60	1.52	2.31

在 Excel 中的 A 列中输入摆长，在 B 列中输入  $T^2$ ，如图 0-2 所示。

	A	B
1	60	2.31
2	70	2.76
3	80	3.24
4	90	3.65
5	100	4.00

图 0-2 单摆实验 Excel 处理——输入数据

下一步，选中 A、B 两列，在插入选项中选择散点图，即可得图 0-3 所示图形。

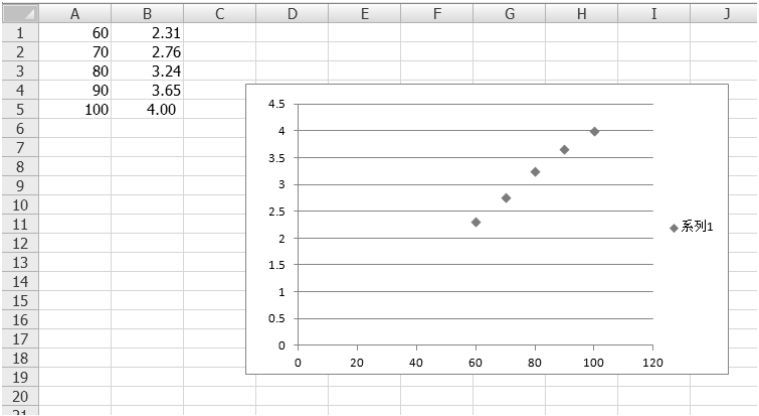


图 0-3 单摆实验 Excel 处理——描点

最后,选中图中的 5 个数据点,右击之后选择添加趋势线,单击“线性”及“显示公式”,即可得到拟合出的直线公式,如图 0-4 所示。

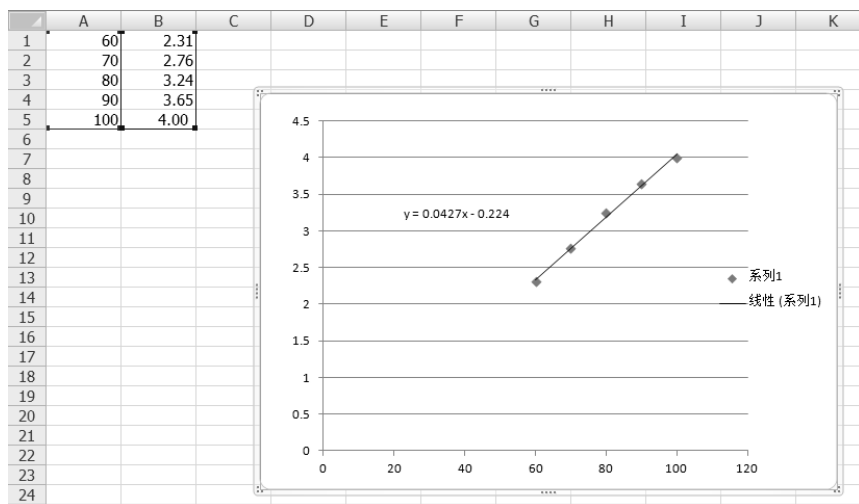


图 0-4 单摆实验 Excel 处理——画线

## § 2 力学、热学实验基本仪器

### § 2-1 游 标 卡 尺

用米尺测量物体的长度时,虽然可以测到 $\frac{1}{10}$  mm,但是最后一位是估读的。在实际长度测量中,常需要将被测的长度测准到 $\frac{1}{10}$  mm 乃至 $\frac{1}{100}$  mm,这不是单纯用米尺就能做到的。为了提高长度测量的精密度,设计制造了多种装置。游标卡尺是其中常见的一种,游标卡尺由主尺和游标两部分组成。

游标卡尺的结构如图 0-5 所示。主尺 D 是一根钢制的毫米分度尺,主尺头上附有钳口 A 和刀口 A',游标 E 上附有钳口 B、刀口 B' 和尾尺 C,可沿主尺滑动。螺丝 F 可将游标固定在主尺上,当钳口 AB 密接时,则刀口 A' B' 对齐,尾尺 C 和主尺尾部也对齐,主尺上的“0”线与游标上的“0”线重合。钳口 AB 用来测量物体的长度及外径,刀口 A' B' 用来测量物体的内径,而尾尺 C 则用来测量物体的深度。测量时,游标的“0”线与主尺的“0”线之间的距离等于所测的长度。

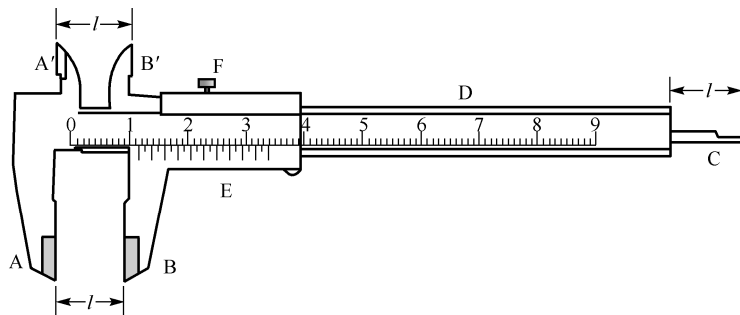


图 0-5 游标卡尺

游标卡尺的规格有多种,其精密程度各不相同,但不论哪一种,它的原理和读数方法都是一样的。常用游标尺在游标尺上刻有  $m$  个分格,这  $m$  个分格的总长正好与主尺上  $m-1$  个分格的总长相等,如果用  $y$  表示主尺上最小分格的长度,用  $x$  表示游标上每一小格的长度,则

$$(m-1)y = mx$$

所以,主尺与游标上每个分格长度的差值是

$$y - x = \frac{y}{m}$$

这个量就是游标卡尺的分度值。通常主尺最小分格  $y$  都为 1mm,因此,游标的分格数越多,分度值就越小,卡尺的精密程度就越高。

常用的游标卡尺的分度值有 0.1mm、0.05mm、0.02mm 三种。若:  $y=1\text{mm}$ ,  $m=10$ , 则  $\frac{y}{m}=0.1\text{mm}$ ;

$y=1\text{mm}$ ,  $m=20$ ,  $\frac{y}{m}=0.05\text{mm}$ ;  $y=1\text{mm}$ ,  $m=50$ , 则  $\frac{y}{m}=0.02\text{mm}$ 。

利用游标卡尺测物体的长度时,把物体放于钳口之间,游标右移。游标“0”线对准主尺上某一位置,被测物体的长度的毫米以上整数部分  $l_0$  可以从主尺上直接读出,毫米以下部分  $\Delta l$  从副尺上读出,如果是游标的第  $n$  条分度线与主尺上某一刻度线对齐,那么

$$\Delta l = ny - nx = n(y - x) = n \frac{y}{m}$$

则物体的长度为

$$l = l_0 + \Delta l = l_0 + n \frac{y}{m}$$

例如,如图 0-6 所示,  $l_0 = 16\text{mm}$ ,  $n = 13$ ,  $m = 50$ ,  $y = 1\text{mm}$ ,  $\frac{y}{m} = 0.02\text{mm}$ , 则

$$l = l_0 + n \frac{y}{m} = 16\text{mm} + 13 \times 0.02\text{mm} = 16.26\text{mm}$$

使用游标卡尺时应注意以下几点。



(1) 使用前, 应该先将游标卡尺的卡口合拢, 检查游标的“0”线和主尺的“0”线是否对齐。若对不齐, 说明卡口有零误差, 应记下零点读数, 即测量值=未做零点修正的读数-零点读数, 其中零点读数可正可负。

(2) 推动游标刻度尺时, 不要用力过猛, 卡住被测物体时松紧应适当, 更不能卡住物体后再移动物体, 以防卡口受损。

(3) 用完后两卡口要留有间隙, 然后将游标卡尺放入包装盒内, 不能随便放在桌上, 更不能放在潮湿的地方。

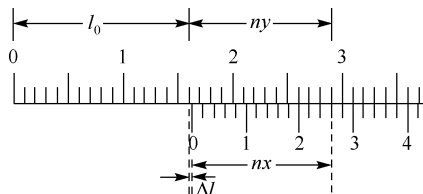


图 0-6 游标卡尺的读数

## § 2-2 螺旋测微计

螺旋测微计又称为千分尺, 是比游标卡尺更精密的长度测量仪器, 多用于测量小球和金属丝的直径或平板厚度。常用的一种螺旋测微计的测量范围为  $0 \sim 25\text{mm}$ , 分度值为  $0.01\text{mm}$ 。螺旋测微计的结构如图 0-7 所示, A 为测砧, F 为测微螺杆, 螺距为  $0.5\text{mm}$ , 螺杆后端与活动套管 E、棘轮 D 相连接。活动套管每旋转一周, 测微螺杆就沿轴线方向前进或后退一个螺距  $0.5\text{mm}$ , 此距离在固定套管 B 的标尺上显示为一个分格。在活动套管的周围边缘上刻有 50 个等分刻度, 活动套管旋转一个刻度, 螺杆就前进或后退  $\frac{0.5\text{mm}}{50} = 0.01\text{mm}$ , 因此, 螺旋测微计的分度值是  $0.01\text{mm}$ , 即螺旋测微计能精确地读到  $0.01\text{mm}$ , 可估读到  $0.001\text{mm}$ 。

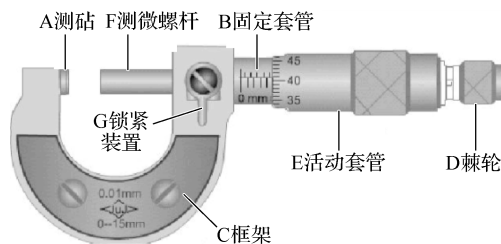


图 0-7 螺旋测微计

读数时, 被测物体长度的  $0.5\text{mm}$  以上部分由固定套管标尺(主尺)上读出,  $0.5\text{mm}$  以下部分则由活动套管(副尺)上的刻度读出, 如图 0-8 所示。

使用螺旋测微计时应注意以下几点。

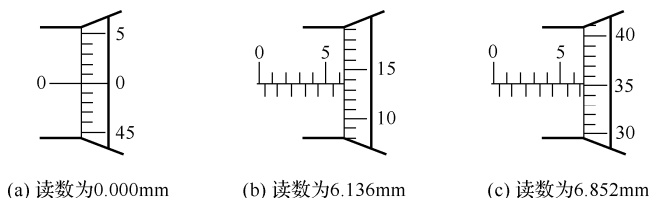


图 0-8 螺旋测微计的读数

(1) 螺旋测微计通常有零点误差，测量前应先记录零点读数，以便对测量值做零点校正。方法是：轻轻旋转棘轮，直到听到“咔咔”响声，表明测微螺杆和测砧已经相接，检查主尺基线与副尺零线是否对齐，如没对齐，应记下这个差数，称之为零点读数，测量值应加以修正，即测量值=未做零点修正的读数值-零点读数，零点读数可正可负。若副尺零线在主尺基线的下方，则取正值；反之，取负值。

(2) 记录零点及当测微螺杆接近待测物时就不要直接旋转活动套管了，以免夹得太紧，影响测量结果及损坏仪器。应该轻轻转动棘轮，只要听到“咔咔”声，就可以读数了。设置棘轮可保证每次的测量条件（对被测物体的压力）一定。

(3) 测量完毕，应在测砧间留下间隙，避免因热膨胀而损坏螺纹。

## § 2-3 物 理 天 平

### 1. 使用介绍

物理天平的构造如图 0-9 所示，在横梁上装有三角刀口，中间刀口置于支柱顶端的玛瑙刀口垫上，作为横梁的支点。两边刀口各有吊架挂着砝码盘，转动制动旋钮，横梁可以上升或下降，当横梁下降时，制动架就会把它托住，以免刀口磨损。横梁两端各有一平衡螺母，用于空载调节平衡。横梁上装有游动砝码，用于 1g 以下质量的称量。

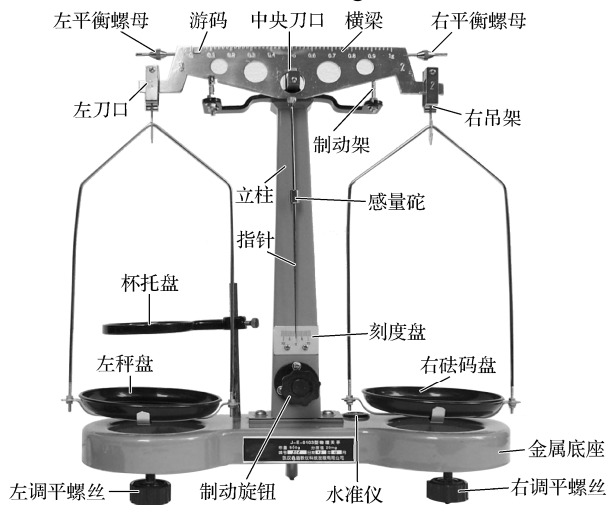


图 0-9 物理天平

物理天平的规格由最大称量值和感量（或灵敏度）来表示。最大称量值是天平允许称量的最大质量。感量就是天平的指针从标牌上零点平衡位置转过一格时天平两盘上的质量差，灵敏度是感量的倒数，感量越小，灵敏度就越高。物理天平的操作步骤如下。

（1）水平调节：使用天平时，首先调节天平底座下的两个调平螺丝，使水准仪中的气泡位于圆圈线的中央位置。

（2）零点调节：天平空载时，将游码拨到左端点，与 0 刻度线对齐。两端吊架悬挂在刀口上，顺时针方向旋转制动旋钮，启动天平，观察天平是否平衡。当指针在刻度尺上来回摆动，左右摆幅近似相等时，便可认为天平达到了平衡。如果不平衡，逆时针方向旋转制动旋钮，使天平制动，调节横梁两端的平衡螺母，再用前面的方法判断天平是否处于平衡状态，直至达到空载平衡为止。

（3）称量：把待测物体放在左称盘中，右砝码盘中放置砝码，轻轻右旋制动旋钮使天平启动，观察天平向哪边倾斜，立即反向旋转制动旋钮，使天平制动，酌情增减砝码，再启动，观察天平倾斜情况。如此反复调整，直到天平能够左右对称摆动。然后调节游码，使天平达到平衡，此时游码的质量就是待测物体的质量。称量时选择砝码应由大到小，逐个试用，直到最后利用游码使天平平衡。

## 2. 维护方法

（1）天平的负载量不得超过其最大称量值，以免损坏刀口或横梁。

（2）为了避免刀口受冲击而损坏，在取放物体、取放砝码、调节平衡螺母及不使用天平时，都必须使天平制动。只有在判断天平是否平衡时才将天平启动。天平启动或制动时，旋转制动旋钮动作要轻。

（3）砝码不能用手直接拿，只能用镊子夹取。从砝码盘上取下后应立即放入砝码盒中。

（4）天平的各部分及砝码都要防锈、防腐蚀，高温物体及有腐蚀性的化学药品不得直接放在盘内称量。

（5）称量完毕将制动旋钮左旋转，放下横梁，保护刀口。

# 力学实验部分

## 实验一 速度、加速度的测定

### 【实验目的】

1. 熟悉气垫导轨的构造，掌握正确的使用方法。
2. 熟悉光电计时系统的工作原理，学会用光电计时系统测量短暂时间的方法。
3. 学会测量物体的速度和加速度。

### 【仪器和用具】

气垫导轨，气源，通用电脑计数器，游标卡尺，物理天平，砝码及托盘等。

### 【实验原理】

牛顿第二定律的表达式为

$$F = Ma \quad (1-1)$$

式中， $F$  为系统所受到的合外力， $M$  为系统总质量， $a$  为系统的加速度。当系统的总质量  $M$  一定时，滑块的加速度  $a$  随着  $F$  的增大而增大，且有  $\frac{F_1}{a_1} = \frac{F_2}{a_2} = \dots = \text{常量} = M$ ，这就表明，当

系统总质量不变时，物体运动的加速度与其所受的合外力成正比。如果滑块所受的合外力不变，则滑块运动的加速度与系统总质量成反比，即  $a_1 m_1 = a_2 m_2 = \dots = \text{常量} = F$ 。即本实验可以做以下验证：

- (1) 验证  $M$  一定时， $a$  与  $F$  成正比。
- (2) 验证  $F$  一定时， $a$  与  $M$  成反比。

把滑块放在水平导轨上。滑块和砝码相连挂在滑轮上，由砝码盘、滑块、砝码和滑轮组成的这一系统，其系统所受到的合外力大小等于砝码（包括砝码盘）的重力  $G$  减去阻力，在本实验中阻力可忽略，因此砝码的重力  $G$  就等于作用在系统上合外力  $F$  的大小。系统的质量  $M$  就等于所加砝码质量  $m_1$ 、滑块的质量  $m_2$  和滑轮的折合质量  $\frac{I}{r^2}$  的总和，忽略滑块与导轨之间的粘性阻力和滑轮的摩擦阻力，根据牛顿第二定律，有

$$F = \left( m_1 + m_2 + \frac{I}{r^2} \right) a \quad (1-2)$$

由于折合质量  $\frac{I}{r^2}$  相对于  $(m_1+m_2)$  而言很小, 故在实际实验中可以忽略, 于是, 式 (1-2) 可近似写成

$$F = (m_1 + m_2)a \quad (1-3)$$

实验装置侧面图如图 1-1 所示, 在导轨上相距  $S$  的两处放置两光电门  $k_1$  和  $k_2$ , 测出此系统在砝码重力作用下滑块通过两光电门的速度  $v_1$  和  $v_2$ , 则系统的加速度  $a$  为

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} \quad (1-4)$$

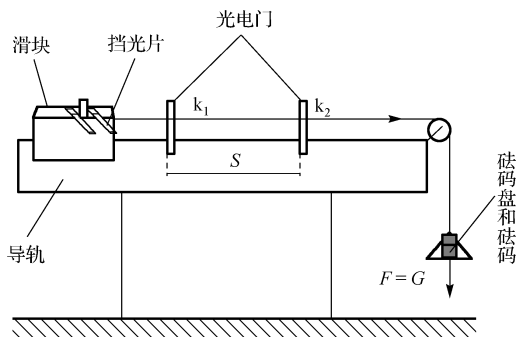


图 1-1 实验装置侧面图

在滑块上放置 U 形挡光片, 假设滑块经过  $k_1$  时计时器记录的时间为  $t_1$ , 经过  $k_2$  时计时器记录的时间为  $t_2$ , 滑块从  $k_1$  运动到  $k_2$  所用的时间为  $\Delta t$ , 则有  $v_1 = \frac{d}{t_1}$  和  $v_2 = \frac{d}{t_2}$ , 其中  $d$  为挡光片的宽度。但是, 由于  $d$  较窄, 所以在  $d$  范围内, 滑块的速度变化比较小, 可把平均速度视为滑块上挡光片经过两光电门时的瞬时速度。 $t$  越小 (相应的遮光片宽度  $d$  也越窄), 则平均速度越能准确地反映滑块在该时刻运动的瞬时速度。

需要说明的是, 计时器中记录的滑块经过光电门运动距离  $d$  所用的时间才是本实验中的直接测量量, 式 (1-4) 中的速度 ( $v_1$  和  $v_2$ ) 和加速度虽然都可以直接从计时器上读出, 但是都是间接测量量。

## 【实验内容与步骤】

### 1. $M$ 一定时, 测 $a$

(1) 打开数字毫秒计时器, 选择“加速度”挡, 将细尼龙线的一端接在滑块上, 另一端绕过滑轮后悬挂一砝码盘, 先把所有砝码放在滑块上, 并将滑块置于第一个光电门外侧, 使挡光片距离第一个光电门约 20cm, 松开滑块, 测出滑块通过两个光电门的时间  $t_1$  和  $t_2$ , 以及滑块从第一个光电门到第二个光电门的时间  $\Delta t$ , 然后按数字毫秒计时器面板上的“转换”键, 分别记录  $v_1$ 、 $v_2$  ( $v_1 = \frac{d}{t_1}$ 、 $v_2 = \frac{d}{t_2}$ ) 和加速度  $a$ 。将数据记录于表 1-1 中。

(2) 逐次从滑块上取下砝码加到砝码盘上，重复上述的操作，测系统总质量相同时的加速度。

## 2. $F$ 一定时，测 $a$

(1) 打开数字毫秒计时器，选择“加速度”挡，将细尼龙线的一端接在滑块上，另一端绕过滑轮后悬挂到一个装有一定量砝码的砝码盘上，将滑块置于第一个光电门外测，使挡光片距离第一个光电门约 20cm，松开滑块，测出滑块通过两个光电门的时间  $t_1$  和  $t_2$ ，以及滑块从第一个光电门到第二个光电门的时间  $\Delta t$ ，然后按数字毫秒计时器面板上的“转换”键，分别记录  $v_1$ 、 $v_2$  和加速度  $a$ 。将数据记录于表 1-2 中。

(2) 逐次改变滑块的质量（通过改变配重），重复上述的操作，测相同作用力下的加速度。

## 【实验数据记录与处理】

(1) 数据记录：挡光片的挡光距离  $d = \underline{\hspace{2cm}}$  cm，滑块的质量  $m_{\text{滑}} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

表 1-1 系统总质量不变时的实验数据表

次数	砝码质量 $m/\text{g}$	光电门 1 $t_1/\text{ms}$	光电门 2 $t_2/\text{ms}$	两光电门 $\Delta t/\text{ms}$	速度 1 $v_1/(\text{cm/s})$	速度 2 $v_2/(\text{cm/s})$	加速度 $a/(\text{cm/s}^2)$
1							
2							
3							
4							
5							

表 1-2 合外力不变时的实验数据表

次数	滑块总质量 $m/\text{g}$	光电门 1 $t_1/\text{ms}$	光电门 2 $t_2/\text{ms}$	两光电门 $\Delta t/\text{ms}$	速度 1 $v_1/(\text{cm/s})$	速度 2 $v_2/(\text{cm/s})$	加速度 $a/(\text{cm/s}^2)$
1							
2							
3							
4							
5							

(2) 分别绘制  $a$ - $F$  图、 $a$ - $M$  图，并对图像进行分析。

## 【注意事项】

1. 防止碰伤轨面和滑块。轨面和滑块之间只有不到 0.2mm 的间隙，如果轨面和滑块内表面被碰伤或变形，则可能出现接触摩擦使阻力显著增大；气轨不供气时，不要在轨上推动滑块。

2. 检查轨面喷气孔是否堵塞。给导轨通气,用小薄纸条逐一检查气孔,发现堵塞时要用细钢丝通一下;使用前可用沾了少许酒精的纱布擦拭轨面及滑块的内表面。

3. 选择合适的挡光。首先检查计时装置是否正常。将计时装置与光电门连接好,要注意套管插头和插孔要正确插入。将两光电门按在导轨上,双挡光片第一次挡光开始计时,第二次挡光停止计时就说明光电计时装置能正常工作;挡光片放在滑块上,再把滑块置于导轨上。

4. 实验后取下滑块,盖上布罩。

### 【思考题】

1. 式(1-1)中的质量  $M$  应该包括哪些物体的质量?作用在滑块上的作用力  $F$  是由什么力产生的?

2. 实验中如果导轨未调平,对验证牛顿第二定律有何影响?

## 实验二 动量守恒的验证

### 【实验目的】

1. 在完全弹性碰撞和完全非弹性碰撞两种情形下验证动量守恒定律。
2. 学习使用气垫导轨和数字毫秒计。
3. 了解完全弹性碰撞和完全非弹性碰撞的特点。

### 【仪器和用具】

气垫导轨、滑块、光电门、挡光片、数字毫秒计、游标卡尺、尼龙粘胶扣。

### 【实验原理】

动量守恒定律指出:若一个系统不受力或受到的合外力等于零,则该系统的总动量(包括方向和大小)保持不变,即总动量

$$P = \sum_{i=1}^n m_i v_i = \text{恒量} \quad (2-1)$$

式中,  $m_i$  和  $v_i$  分别是系统中第  $i$  个物体的质量和速度,  $n$  是组成该系统的物体的个数。若系统所受合力在某一方向的分量为零,则此系统在该方向的总动量守恒。

本实验研究两个滑块在水平的气垫导轨上沿一直线碰撞的情况,如图 2-1 所示。水平气轨上滑块的运动可近似看成无摩擦阻力的,且空气阻力及粘滞力可忽略不计,则两个滑块所组成的系统在水平方向上除了受到碰撞时彼此相互作用的内力外,不受其他合外力作用,该系统在运动方向上动量守恒。

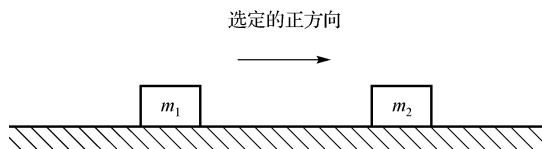


图 2-1 碰撞示意图

设两个滑块的质量分别为  $m_1$  和  $m_2$ ，它们碰撞前的速度分别为  $v_{10}$  和  $v_{20}$ ，碰撞后的速度分别为  $v_1$  和  $v_2$ ，若设定了速度的正方向，则有下列关系

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad (2-2)$$

下面分两种情况讨论。

### 1. 完全弹性碰撞

完全弹性碰撞下，系统的动量守恒，机械能也守恒。实验中，将两滑块相碰端装上缓冲弹簧圈，由于缓冲弹簧圈形变后能迅速恢复原状，系统的机械能近似无损失，从而实现两滑块的碰撞为弹性碰撞。由于两滑块碰撞前后无势能的变化，故系统的机械能守恒就体现为系统的总动能守恒，即

$$\frac{1}{2} m_1 v_{10}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{20}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (2-3)$$

若两个滑块质量相等，即  $m_1 = m_2 = m$  且  $v_{20} = 0$ ，则由式 (2-2) 和式 (2-3)，并考虑物理上的实际情况，将得到两个滑块彼此交换速度，即

$$v_1 = 0, v_2 = v_{10}$$

若两个滑块质量不相等，即  $m_1 \neq m_2$ ，仍令  $v_{20} = 0$ ，则有

$$m_1 v_{10} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad \text{和} \quad m_1 v_{10}^2 = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2$$

将上面两式联立，可解得

$$v_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_{10} \quad (2-4)$$

$$v_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_{10} \quad (2-5)$$

由此可见，若  $m_1 < m_2$ ， $v_1 < 0$ 、 $v_2 > 0$ ，即两滑块相向运动；若  $m_1 > m_2$ ，两滑块则始终同向运动。

### 2. 完全非弹性碰撞

若两滑块相碰后，以同一速度沿直线运动而不分开，则称这种碰撞为完全非弹性碰撞，其特点是碰撞前后系统的动量守恒，而机械能不守恒。在实验中将滑块碰撞端装上尼龙粘胶扣，以使两滑块碰撞后粘在一起以同一速度运动，从而实现完全非弹性碰撞。

设完全非弹性碰撞后两滑块的共同速度为  $v$ ，即  $v_1 = v_2 = v$ ，则有

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = (m_1 + m_2) v \quad (2-6)$$



所以

$$v = \frac{m_1 v_{10} + m_2 v_{20}}{m_1 + m_2} \quad (2-7)$$

当  $m_1 = m_2$ ，且  $v_{20} = 0$  时，则有  $v = \frac{1}{2} v_{10}$ 。

## 【实验内容与步骤】

### 1. 在完全弹性碰撞情形下验证动量守恒定律

(1) 将气垫道轨调水平，数字毫秒计功能键选择到“碰撞”挡，使数字毫秒计处于正常工作状态。

(2) 取两个质量近似相等的滑块，分别装上挡光片和弹簧圈，用天平称出两个滑块的质量  $m_1$  和  $m_2$ （包括挡光片和弹簧圈，此时有  $m_1 \approx m_2$ ）。

(3) 接通气阀后，将滑块  $m_2$  置于两光电门之间（两光电门距离不可太远），并令它静止（ $v_{20} = 0$ ）。如图 2-2 所示，将另一个滑块  $m_1$  放置在导轨的另一端，通过缓冲弹簧来推动滑块 1，也可在滑块  $m_1$  后面再加一小滑块，用小滑块去推动滑块  $m_1$ ，让滑块  $m_1$  与  $m_2$  相撞，记下  $m_1$  通过第一个光电门的时间  $\Delta t_{10}$ ，按下数字毫秒计的“转换”键，就可以得到  $m_1$  通过第一个光电门的速度  $v_{10}$ 。

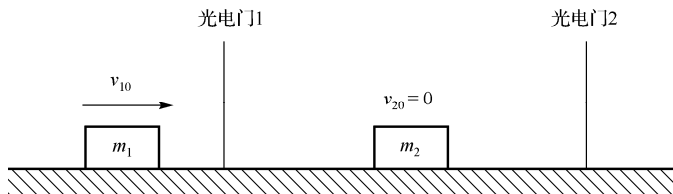


图 2-2 验证动量守恒定律示意图

(4) 两滑块碰撞之后，滑块  $m_1$  将静止，而滑块  $m_2$  以速度  $v_2$  向前运动，记下  $m_2$  通过第二个光电门的时间  $\Delta t_2$ ，按下数字毫秒计的“转换”键，就可以得到  $m_2$  通过第二个光电门的速度  $v_2$ ，重复三次，记录所测数据，填入表 2-1。

(5) 取一大一小两个滑块（如  $m_1 > m_2$ ），重复（1）、（2）、（3），并记录  $m_1$  通过第一个光电门的时间  $\Delta t_{10}$ ，按下数字毫秒计的“转换”键，就可以得到  $m_1$  通过第一个光电门的速度  $v_{10}$ ，以及碰撞之后，滑块  $m_1$  和滑块  $m_2$  先后通过第二个光电门的时间  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$ ，按下数字毫秒计的“转换”键，就可以得到相应的速度  $v_1$  和  $v_2$ ，重复三次，记录所测数据，填入表 2-2。

(6) 利用测得的数据分别验证每次碰撞前后的动量是否守恒，并计算相对误差  $E = \frac{\Delta p}{p} = \frac{|p' - p_0|}{p_0} \times 100\%$ ，其中  $p'$  为末动量， $p_0$  为碰撞之前的总动量，写出实验的结论。

### 2. 在完全非弹性碰撞情形下验证动量守恒定律

(1) 在选定的两个滑块的相碰端安装尼龙粘胶扣。

(2) 检验以下两种情形下，动量是否守恒。

- ① 两滑块的质量相等时 ( $m_1 \approx m_2$ )，并且  $v_{20} = 0$ ；
- ② 两滑块的质量不等时 ( $m_1 \neq m_2$ )，并且  $v_{20} = 0$ 。
- (3) 参照实验内容 1，自行完成实验，自拟数据表格，计算出实验结果，写出实验的结论。

【实验数据记录与处理】

表 2-1 完全弹性碰撞实验数据记录表 ( $m_1 \approx m_2$ )

$m_1 = \text{___g}$ , $m_2 = \text{___g}$ , $v_{20} = 0 \text{ cm/s}$ , 挡光板宽度 $\Delta x = \text{___cm}$						
次数	$\Delta t_{10} / \text{s}$	$v_{10} / (\text{cm/s})$	$\Delta t_2 / \text{s}$	$v_2 / (\text{cm/s})$	$P_0 = m_1 v_{10} / (\text{g} \cdot \text{cm/s})$	$P' = m_1 v_1 + m_2 v_2 / (\text{g} \cdot \text{cm/s})$
1						
2						
3						

表 2-2 完全弹性碰撞实验数据记录表 ( $m_1 \neq m_2$ )

$m_1 = \text{___g}$ , $m_2 = \text{___g}$ , $v_{20} = 0 \text{ cm/s}$ , 挡光板宽度 $\Delta x = \text{___cm}$								
次数	$\Delta t_{10} / \text{s}$	$v_{10} / (\text{cm/s})$	$\Delta t_2 / \text{s}$	$v^2 / (\text{cm/s})$	$\Delta t_1 / \text{s}$	$v_1 / (\text{cm/s})$	$m_1 v_{10} / (\text{g} \cdot \text{cm/s})$	$m_1 v_1 + m_2 v_2 / (\text{g} \cdot \text{cm/s})$
1								
2								
3								

【注意事项】

- 1. 实验时，应保证安装在滑块上的弹簧圈是对称和牢固的，以保证对心碰撞，尽量避免碰撞时滑块的晃动。
- 2. 实验时，最好不要用手直接推滑块  $m_1$  去撞滑块  $m_2$ ，可通过缓冲弹簧来推动滑块  $m_1$ ，也可在滑块  $m_1$  后面再加一小滑块，用小滑块去推动滑块  $m_1$ ，以保证推力和轨面平行。

【思考题】

- 1. 实验时气轨是否要调水平？若没有调水平，气轨向右或向左倾斜时，对实验有何影响？
- 2. 当光电门距离碰撞点的位置不同时，对实验是否有影响？试比较把光电门放在靠近或远离碰撞位置时的实验结果。
- 3. 对你使用的实验装置，如果取  $m_1 = m_2$ ， $v_{20} = 0$ ，并且认为  $v_1 = 0$ ，将对结果引入多大的误差？

实验三 用三线摆测量刚体转动惯量

【实验目的】

- 1. 掌握用三线摆测量刚体转动惯量的原理和方法。
- 2. 验证平行轴定理。

## 【仪器和用具】

三线摆实验仪、通用计数计时器、游标卡尺、米尺、待测样品（圆环，两个圆柱体）。

## 【实验原理】

三线摆是通过扭转运动测量刚体转动惯量的一种装置，图 3-1 所示为三线摆实验仪结构简图。图 3-2 所示为三线摆实验装置的示意图。它是将一个均质圆盘，以等长的三条线对称地悬挂在一个水平固定的小圆盘下面。上、下圆盘均处于水平，悬挂在横梁上。三个对称分布的等长悬线将两圆盘相连。上圆盘固定，下圆盘可绕中心轴  $OO'$  扭转做扭摆运动。扭摆运动的过程也就是圆盘势能与动能的转化过程。扭摆运动的周期  $T$  和下圆盘的质量分布有关，当改变下圆盘的转动惯量（改变质量分布）时，扭摆运动周期也相应地发生变化。三线摆就是通过测定它的扭摆运动周期来测定待测物的转动惯量的。

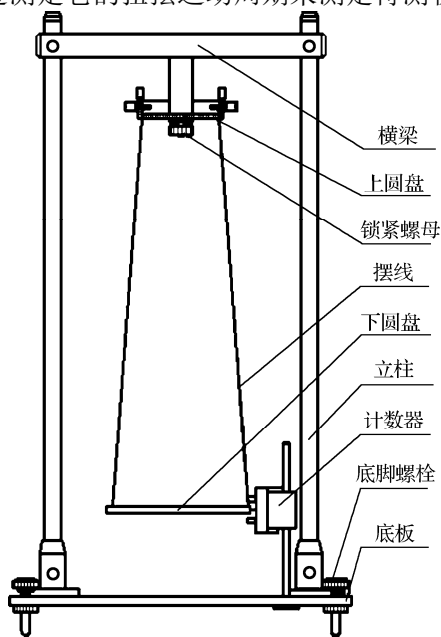


图 3-1 实验仪结构简图

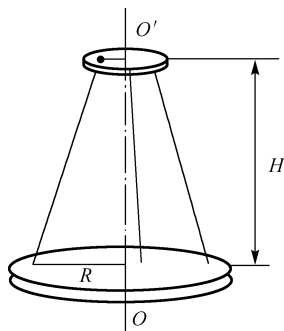


图 3-2 三线摆实验装置的示意图

当下盘转动角度很小，且略去空气阻力时，扭摆的运动可近似视为简谐运动。根据能量守恒定律和刚体转动定律均可以导出物体绕中心轴  $OO'$  的转动惯量。如图 3-3 所示，下圆盘可绕  $OO'$  轴扭转，设下圆盘质量为  $m$ ，当它绕  $OO'$  做小角度扭动  $\theta$  时，圆盘位置升高了  $h$ ，则势能  $E_p$  为

$$E_p = mgh \quad (3-1)$$

动能  $E_k$  为

$$E_k = \frac{1}{2} I_0 \omega^2 = \frac{1}{2} I_0 \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (3-2)$$

式中,  $I_0$  为下圆盘沿  $OO'$  轴的转动惯量, 若不计摩擦阻力, 则下圆盘的势能与动能之和应保持不变, 即

$$mgh + \frac{1}{2} I_0 \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \text{常量} \quad (3-3)$$

设悬线长为  $L$ , 上、下圆盘半径分别为  $r$  和  $R$ , 当上、下圆盘扭转一角度  $\theta$  时, 从上圆盘  $B$  点作下圆盘垂线, 与升高  $h$  前、后的下圆盘分别交于  $C$  和  $C_1$ , 如图 3-3 所示, 则有

$$h = BC - BC_1 = \frac{BC^2 - BC_1^2}{BC + BC_1} \quad (3-4)$$

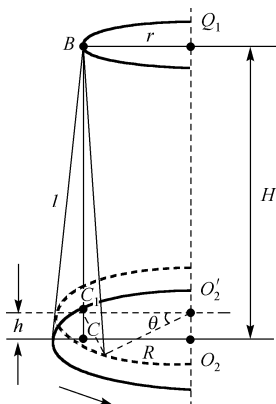


图 3-3 下圆盘

$$\text{而 } BC^2 = AB^2 - AC^2 = L^2 - (R-r)^2$$

$$BC_1^2 = A_1B^2 - A_1C_1^2 = L^2 - (R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta)$$

$$\text{所以 } h = \frac{2Rr(1 - \cos \theta)}{BC + BC_1} = \frac{4Rr \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} \right)}{BC + BC_1} \quad (3-5)$$

在偏转角很小时,  $\sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$ , 而  $BC + BC_1 \approx 2H$ , 则

$$h = \frac{Rr\theta^2}{2H} \quad (3-6)$$

将式 (3-6) 代入式 (3-3), 并对  $t$  微分可得

$$I_0 \frac{d\theta}{dt} \frac{d^2\theta}{dt^2} + mg \frac{Rr}{H} \theta \frac{d\theta}{dt} = 0 \quad (3-7)$$

即

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{mgRr}{I_0 H} \theta \quad (3-8)$$

式 (3-8) 为一简谐振动方程, 故该振动的角频率  $\omega$  的平方应为

$$\omega^2 = \frac{mgRr}{I_0 H} \quad (3-9)$$

振动周期  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega}$ ，所以

$$T_0^2 = \frac{4\pi^2 I_0 H}{mgRr} \quad (3-10)$$

由此得出

$$I_0 = \frac{mgRr}{4\pi^2 H} T_0^2 \quad (3-11)$$

式 (3-11) 是测量下圆盘绕线中心轴转动惯量的计算公式。若在实验过程中，分别测出  $m$ 、 $R$ 、 $r$ 、 $H$  及  $T$ ，就可以通过式 (3-11) 求出圆盘的转动惯量  $I_0$ 。如果在下圆盘上放上另一个质量为  $M$ 、转动惯量为  $I$  (对  $OO'$  轴) 的物体时，则有

$$I + I_0 = \frac{(m+M)gRr}{4\pi^2 H} T^2 \quad (3-12)$$

将式 (3-11) 代入式 (3-12) 得

$$I = \frac{gRr}{4\pi^2 H} [(m+M)T^2 - mT_0^2] \quad (3-13)$$

根据式 (3-13)，通过长度、质量和扭摆周期的测量，便可求出刚体绕中心轴的转动惯量。由式 (3-13) 可知，各物体对同一转轴的转动惯量满足线性相加减的关系。

用三线摆法还可以验证平行轴定理。若质量为  $m$  的物体绕过其质心轴的转动惯量为  $I_c$ ，当转轴平行移动距离  $d$  时，则此物体对新轴的转动惯量为  $I' = I_c + md^2$ 。这一结论称为转动惯量的平行轴定理。

将两个相同的圆柱体对称地置于下圆盘上，如图 3-4 所示，圆柱体的中心到下圆盘中心的距离为  $d$ 。

设圆柱体的质量为  $m_1$ ，对圆柱轴线的转动惯量为  $I_1$ ，则根据平行轴定理，如图放置圆柱体时，下圆盘加圆柱体后的转动惯量为  $I_0 + 2(I_1 + m_1 d^2)$ ，其总质量为  $m + 2m_1$ 。

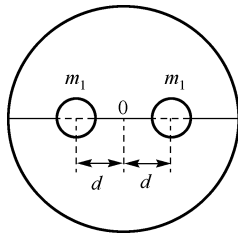


图 3-4 圆柱体对称图

通过实验测出两小圆柱体和下圆盘绕中心轴  $OO'$  的转动周期  $T_1$ ，则可求出每个柱体对中心转轴  $OO'$  的转动惯量

$$I_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{(m_0 + 2m_1)gRr}{4\pi^2 H} T_1^2 - I_0 \right] \quad (3-14)$$

如果测出小圆柱中心与下圆盘中心之间的距离  $d$  及小圆柱体的半径  $R_x$ ，则由平行轴定理可求得

$$I_1' = m_1 d^2 + \frac{1}{2} m_1 R_x^2 \quad (3-15)$$

比较  $I_1$  与  $I_1'$  的大小，可验证平行轴定理。

## 【实验内容与步骤】

### 1. 测定圆环对于通过质心且垂直于环面的轴的转动惯量

(1) 调节底座水平：将水平泡置于横梁中心位置，调节底脚螺栓，使水平泡处于中间位置。

(2) 调节下盘水平：将水平仪放在下盘中央，调节三根摆线的调节螺栓，使水平仪气泡处于中间位置，用米尺测量上、下圆盘间高度  $H$ 。

(3) 记下圆盘、圆环、小圆柱的质量。

(4) 用游标卡尺测出上、下圆盘圆心到悬挂点的距离  $r$  和  $R$ ：由于悬挂点构成一个正三角形，测量出上圆盘悬挂点之间的距离  $a$ ，则  $r = \frac{\sqrt{3}}{3}a$ ，同法可测  $R$ 。上述各量都做多次测量，再取平均值。

(5) 用累积放大法测定扭摆转动的周期，即用计时工具测量累积多个周期的时间，然后求出其运动周期（想一想，为什么不直接测量一个周期？）。如用秒表手动计时，应以过平衡位置作为计时的起止时刻（想一想，为什么？），并默读 5、4、3、2、1、0，当数到“0”时启动停表，这样既有一个计数的准备过程，又不至于少数一个周期。

(6) 检验下圆盘的转动惯量  $I_0$ 。

计算下圆盘的转动惯量  $I_0$ ，将测量值  $I_0$  与理论值  $I'$ （ $I' = mD^2/8$ ， $D$  为下圆盘直径）相比，二者差异是否超过测量误差范围。如果差异较大，分析其原因，重新做实验。

(7) 把待测圆环置于下圆盘的圆心位置上（注意使圆环与圆盘中心重合），测出圆环与下圆盘叠加后的振动周期  $T$ 。

(8) 求出此时的转动惯量，并减去下圆盘的转动惯量，即为圆环的转动惯量。

## 2. 验证转动惯量的平行轴定理

(1) 将两个相同的圆柱体对称地置于下圆盘上，如图 3-4 所示。圆柱体的中心到下圆盘中心的距离为  $d$ 。圆柱体的质量为  $m_1$ ，对圆柱轴线的转动惯量为  $I_1$ 。测出此时扭摆的转动周期  $T_1$ ，根据式 (3-14) 和式 (3-15) 即可验证平行轴定理。

(2) 也可以用作图法。根据平行轴定理，如图 3-4 放置圆柱体时，下圆盘加圆柱体后的转动惯量为  $I_0 + 2(I_1 + m_1 d^2)$ ，其总质量为  $m + 2m_1$ ，参照式 (3-10) 可推算出：

$$T_1^2 = \frac{4\pi^2 H}{(m + 2m_1)gRr} [I_0 + 2(I_1 + m_1 d^2)] \quad (3-16)$$

展开式 (3-16) 得

$$T_1^2 = \left[ \frac{4\pi^2 H}{(m + 2m_1)gRr} (I_0 + 2I_1) \right] + \left[ \frac{4\pi^2 H \cdot 2m_1}{(m + 2m_1)gRr} \right] d^2 \quad (3-17)$$

从  $d=0$  改变圆柱体的位置，测出各  $d$  值对应的周期值  $T_1$ ，然后用坐标纸或用计算机作  $T_1^2 - d^2$ （ $T_1^2$  为纵坐标， $d^2$  为横坐标）直线，该直线的纵轴截距将等于式 (3-17) 中的  $\frac{4\pi^2 H}{(m + 2m_1)gRr} (I_0 + 2I_1)$ ，

直线斜率为  $\frac{4\pi^2 H \cdot 2m_1}{(m + 2m_1)gRr}$ ，直线的截距和斜率的比值为  $\frac{I_0 + 2I_1}{2m_1}$ 。

验证平行轴定理，在此检验：

(1) 用 Excel 作  $T_1^2 - d^2$  的关系曲线，判断其是否为线性关系。

(2) 下圆盘加上圆柱体后的转动惯量为  $I_0 + 2(I_1 + m_1 d^2)$ , 取  $d = 0$ , 结合式 (3-12) 求出总的转动惯量  $I_0 + 2I_1$ 。比较直线  $T_1^2 - d^2$  的截距和斜率之比是否等于  $\frac{I_0 + 2I_1}{2m_1}$  (在测量范围之内)。求  $T_1^2 - d^2$  直线的截距和斜率, 可用直线拟合法拟合直线求出。

### 【实验数据记录与处理】

参考表格:

表 3-1 累积法测周期的实验数据记录表

摆动 20 次所需时间/s	次数	下圆盘	下圆盘加圆环	下圆盘加圆柱体
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
平均值				
周期		$\bar{T}_0 = \text{___} \text{s}$	$\bar{T} = \text{___} \text{s}$	$\bar{T}_1 = \text{___} \text{s}$

表 3-2 有关长度多次测量的实验数据记录表

项目次数	上盘悬孔间距 $a/\text{cm}$	下盘悬孔间距 $b/\text{cm}$	待测圆环		小圆柱体直径 $2R_s/\text{cm}$
			外直径 $2R_1/\text{cm}$	内直径 $2R_2/\text{cm}$	
1					
2					
3					
4					
5					
平均					
	$\bar{a} = \frac{\sqrt{3}}{3} \bar{a} = \text{___}$	$\bar{b} = \frac{\sqrt{3}}{3} \bar{b} = \text{___}$	$\bar{R}_1 = \text{___}$	$\bar{R}_2 = \text{___}$	$\bar{R}_s = \text{___}$

下盘质量  $m = \text{___}$ , 待测圆环质量  $M = \text{___}$ , 圆柱体质量  $m_1 = \text{___}$ ,  $H = \text{___}$ 。

根据以上数据, 求出待测圆环的转动惯量, 将其与理论值计算值比较, 求相对误差, 并进行讨论。已知理想圆环绕中心轴转动惯量的计算公式为  $I_{\text{理论}} = \frac{M}{2}(\bar{R}_1^2 + \bar{R}_2^2)$ 。直径为  $D$ , 质量为  $m$  的圆盘的转动惯量理论计算公式为  $I_0 = \frac{1}{8}mD^2$ 。

表 3-3 验证平行轴定理的实验数据记录表

项目 次数	小孔间距 $2d/\text{cm}$	周期 $T_1/\text{s}$	实验值/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) $I_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{(m + 2m_1) g \bar{R} \bar{r}}{4\pi^2 H} T_1^2 - I_0 \right]$	理论值/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) $I'_1 = m_1 d^2 + \frac{1}{2} m_1 \bar{R}_s^2$
1				
2				

续表

项目 次数	小孔间距 $2d/\text{cm}$	周期 $T_1/\text{s}$	实验值/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ $I_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{(m + 2m_1)g\bar{R}\bar{r}}{4\pi^2 H} T_1^2 - I_0 \right]$	理论值/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ $I_1' = m_1 d^2 + \frac{1}{2} m_1 \bar{R}_x^2$
3				
4				
5				

由上表数据分析实验误差，由得出的数据给出是否验证了平行轴定理的结论。

【思考题】

- 1. 将一半径小于下圆盘半径的圆盘放在下圆盘上，并使中心一致，试讨论此时三线摆的周期和空载时的周期相比是增大、减小还是不一定？
- 2. 你是否能用其他的方法验证平行轴定理？
- 3. 用三线摆测刚体转动惯量时，为什么必须保持下盘水平？
- 4. 在测量过程中，如下盘出现晃动，对周期测量有影响吗？如有影响，应如何避免？
- 5. 测量圆环的转动惯量时，若圆环的转轴与下盘转轴不重合，对实验结果有何影响？
- 6. 如何利用三线摆测定任意形状的物体绕某轴的转动惯量？
- 7. 三线摆在摆动中受空气阻尼，振幅越来越小，它的周期是否会变化？对测量结果影响大吗？为什么？

实验四 拉伸法测定杨氏模量

【实验目的】

- 1. 掌握用拉伸法测定金属丝的杨氏模量。
- 2. 学会用光杠杆测量长度的微小变化。
- 3. 学会用逐差法处理数据。

【仪器和用具】

杨氏模量测量仪，光杠杆，镜尺组，钢卷尺，螺旋测微计，钢直尺，砝码。

【实验原理】

1. 胡克定律和杨氏弹性模量

当固体受外力作用时，它的体积和形状将要发生变化，这种变化称为形变。物体的形变可分为弹性形变和塑性形变。固体材料的弹性形变又可分为纵向、切变、扭转、弯曲。当外力不太大时，物体的形变与外力成正比，且外力停止作用物体立即恢复原来的形状和体积，



这种形变称弹性形变。当外力较大时, 物体的形变与外力不成比例, 且当外力停止作用后, 物体形变不能完全消失, 这种形变称为范性形变。范性形变的产生是由于物体形变而产生的内应力(大小等于单位面积上的作用力)超过了物体的弹性限度(屈服极限)的缘故。如果再继续增大外力, 当物体产生的内应力超过物体的强度极限时, 物体便被破坏了。胡克定律指出: 在物体的弹性限度内, 应力与应变成正比, 其比例系数称为杨氏模量(记为  $E$ )。在数值上等于产生单位应变时的应力。它的单位与应力的单位相同。其中: 单位面积上所受到的力称为应力, 应变是指在外力作用下的相对形变, 它反映了物体形变的大小。杨氏模量来描述材料抵抗纵向弹性形变的能力。

设有一根长为  $L$ , 横截面积为  $S$  的钢丝, 在外力  $F$  作用下伸长了  $\Delta L$ , 则

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta L}{L} \quad (4-1)$$

式中, 比例系数  $E$  称为杨氏模量, 单位为  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。设实验中所用钢丝直径为  $d$ , 则  $S = \frac{1}{4}\pi d^2$ , 将此式代入式(4-1)整理以后得

$$E = \frac{4FL}{\pi d^2 \Delta L} \quad (4-2)$$

式(4-2)表明, 对于长度  $L$ , 直径  $d$  和所加外力  $F$  相同的情况下, 杨氏模量  $E$  大的金属丝的伸长量  $\Delta L$  小。因而, 杨氏模量表达了金属材料抵抗外力产生拉伸(或压缩)形变的能力。杨氏模量是表征固体材料性质的一个重要的物理量, 是工程设计上选用材料时常需涉及的重要参数之一, 一般只与材料的性质和温度有关, 与外力及物体的几何形状无关。对一定材料而言,  $E$  是一个常数, 它仅与材料的结构、化学成分及其加工制造的方法有关。杨氏模量的大小标志了材料的刚性。

为能测出金属丝的杨氏模量  $E$ , 必须准确测出式(4-2)中右边各量。其中  $L$ 、 $d$ 、 $F$  都可用一般方法测得, 唯有  $\Delta L$  是一个微小的变化量, 用一般量具难以测准, 为了测量细钢丝的微小长度变化, 实验中使用了光杠杆放大法间接测量。利用光杠杆不仅可以测量微小长度变化, 也可测量微小角度变化和形状变化。由于光杠杆放大法具有稳定性好、简单便宜、受环境干扰小等特点, 在许多生产和科研领域得到广泛应用。

## 2. 光杠杆和镜尺系统是测量微小长度变化的装置

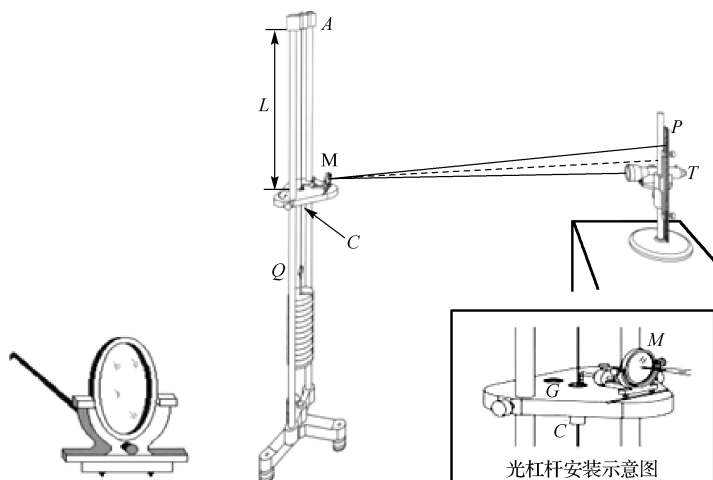
光杠杆结构如图 4-1(a)所示, 它实际上是附有三个尖足的平面镜。三个尖足的边线为等腰三角形。前两足刀口与平面镜在同一平面内(平面镜俯仰方位可调), 后足在前两足刀口的中垂线上。镜尺系统由一把竖立的毫米刻度尺和在尺旁的一个望远镜组成。镜尺系统和光杠杆组成如图 4-1(b)所示的测量系统。

另一种杨氏模量测量装置如图 4-2 所示, 两种装置的原理是完全一样的, 只是构造上略有不同而已。

将光杠杆和镜尺系统按图 4-1 或图 4-2 安装好, 并按仪器调节步骤调节好全部装置之后, 就会在望远镜中看到由镜面  $M$  反射的直尺(标尺)的像。标尺是一般的米尺, 但中间刻度为 0。其光路部分如图 4-3 所示。图中  $M_1$  表示钢丝处于伸直情况下光杠杆小镜的位置。从望远

镜的目镜中可以看见水平叉丝对准标尺的某一刻度线  $n_0$ ，当在钩码上增加砝码（第  $i$  块）时，因钢丝伸长致使置于钢丝下端附着在平台上的光杠杆后足  $P$  跟随下降到  $P'$ ， $PP'$  即为钢丝的伸长  $\Delta L_i$ ，于是平面镜的法线方向转过角度  $\theta$ ，此时平面镜处于位置  $M_2$ 。在固定不动的望远镜中会看到水平叉丝对准标尺上的另一刻线  $n_i$ ，假设开始时对光杠杆的入射和反射光线重合，当平面镜转角度  $\theta$  时，入射到光杠杆镜面的光线方向就要偏转  $2\theta$ ，故  $\angle n_0 O n_i = 2\theta$ ，因  $\theta$  很小， $OO'$  也很小，故可认为平面镜到标尺的距离  $D \approx O'n_0$ ，且有

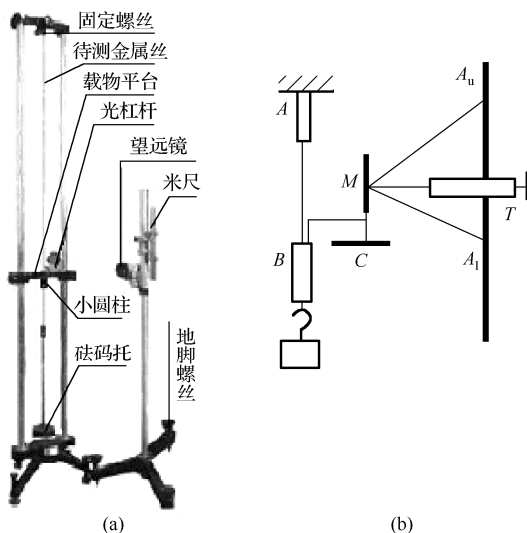
$$\tan 2\theta \approx 2\theta \approx \frac{n_i - n_0}{D} = \frac{\Delta n}{D}$$



(a) 光杠杆结构

(b) 测量系统

图 4-1 光杠杆和实验装置示意图（一）



(a)

(b)

图 4-2 光杠杆和实验装置示意图（二）

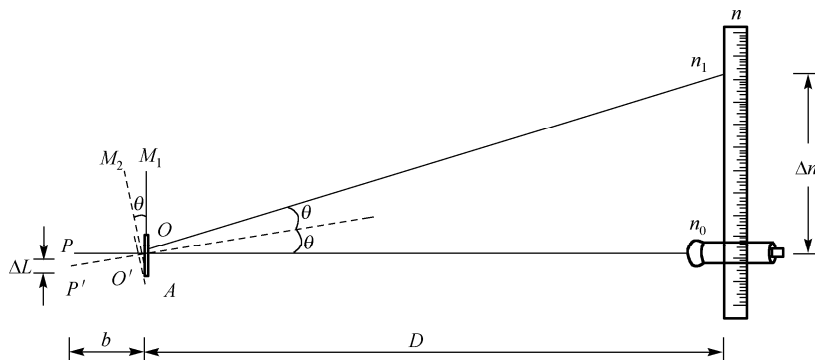


图 4-3 光杠杆放大原理

即 
$$\theta = \frac{\Delta n}{2D} \quad (4-3)$$

又从  $OPP'$ , 得

$$\theta \approx \tan \theta \approx \frac{\Delta L_i}{b} \quad (4-4)$$

式中,  $b$  为光杠杆后足至两前足连线的垂直距离, 称为光杠杆常数。由以上两式得

$$\Delta L_i = \frac{b\Delta n}{2D} = W\Delta n \quad (4-5)$$

式中,  $\frac{1}{W} = \frac{2D}{b}$ , 可称为光杠杆的“放大率”。式中  $b$  和  $D$  可以直接测量, 因此当增加质量为  $m$  的砝码时, 只要在望远镜测得标尺刻线移过的距离  $\Delta n$ , 即可算出钢丝的相应伸长  $\Delta L_i$ 。将  $\Delta L_i$  值代入式 (4-2) 后得:

$$E = \frac{8mgLD}{\pi bd^2(n_i - n_0)} = \frac{8mgLD}{\pi bd^2\Delta n} \quad (4-6)$$

常用单位是  $\text{N/m}^2$ 。式中的  $\Delta n = (n_i - n_0)$  为加砝码前后望远镜直尺读数的变化量, 若设  $K = \frac{n_i - n_0}{m}$ , 则  $K$  为砝码质量改变一个单位时, 望远镜中所见的读数变化量, 则式 (4-6) 也可写成

$$E = \frac{8mgLD}{\pi d^2 Kb} \quad (4-7)$$

### 【实验内容与步骤】

1. 夹好钢丝, 调整支架呈竖直状态, 在钢丝的下端悬一钩码和适量砝码 (这些质量不算在以后各次所加质量之内), 使钢丝能够自由伸张。
2. 将光杠杆放在平台上, 调节平台的上下位置, 尽量使三足在同一个水平面上。

3. 安置好光杠杆, 前足刀口置于固定平台的沟线内, 后足置于钢丝下端附着的平台上, 并靠近钢丝, 但不能接触钢丝。不要靠着圆孔边, 也不要放在夹缝中。使平面镜  $M$  与平台大致垂直。

4. 在杨氏模量测定仪前方约  $1.5\text{m}$  处放置望远镜直横尺, 并使望远镜和光杠杆在同一个高度, 并使光杠杆的镜面和标尺都与钢丝平行。

5. 调节望远镜, 使之处与平面镜处于同一高度; 沿望远镜筒上面的缺口和准星观察到平面镜  $M$ ; 通过改变平面镜  $M$  的仰角, 能够从标尺附近通过平面镜  $M$  反射看到望远镜。调节右侧的物镜调焦手轮和调节镜筒下面的竖直旋钮, 改变平面镜  $M$  的仰角, 从望远镜中先寻找到平面镜  $M$ , 并对准平面镜  $M$  中心; 然后调节望远镜物镜调焦手轮看到标尺的像。如无标尺的像, 则可在望远镜外观察, 移动望远镜, 使准星  $A$ 、 $B$  与平面镜中标尺像在一条直线上, 这时在望远镜中就可以看到标尺的像。调节目镜看清十字叉丝。观察望远镜中能清楚地看到标尺刻度。标尺要竖直, 望远镜应水平对准平面镜中部。

6. 试加几个砝码, 估计一下满负荷时标尺读数是否够用, 如不够用, 应对平面镜进行微调, 调好后取下砝码。

7. 记录望远镜中水平叉丝对准的标尺刻度初始读数  $n_0$  (不一定要为零), 再在钢丝下端加砝码 ( $1.0\text{kg}$ ), 记录望远镜中标尺读数  $n_1$ , 以后依次加  $1.0\text{kg}$  的砝码, 并分别记录望远镜中标尺读数。这是增量过程中的读数。然后每次减少  $1.0\text{kg}$  的砝码, 并记下减重时望远镜中标尺的读数, 填写在数据记录表格中 (见后面数据记录部分)。

8. 用米尺测量平面镜与标尺之间的距离、钢丝长度, 用游标卡尺测量光杠杆长度  $b$  (用光杠杆在纸上按一下, 留下  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$  三点的痕迹, 连成一个等腰三角形。作其底边上的高, 即可测出  $b$ 。用螺旋测微器测量钢丝直径  $d$ , 测量 5 次。可以在钢丝的不同部位和不同径向测量。

9. 用分组逐差法计算  $(n_i - n_0)$ , 
$$n_i - n_0 = \frac{(n_3 - n_0) + (n_4 - n_1) + (n_5 - n_2)}{3}$$
, 此时  $F = mg$ ,  $m = 3\text{kg}$ , 由式 (4-6) 就可以计算杨氏模量  $E$ , 并计算误差  $\Delta E$  (误差公式为  $\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{2\Delta d}{d} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta(n_i - n_0)}{n_i - n_0}$ ,  $\Delta(n_i - n_0) = \frac{\Delta n_0 + \Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3 + \Delta n_4 + \Delta n_5}{3}$ , 其中不计砝码质量的误差)。

### 【注意事项】

1. 实验系统调好后, 一旦开始测量, 在实验过程中绝对不能对系统的任一部分进行任何调整。否则, 所有数据将重新再测。

2. 增减砝码时要防止砝码晃动, 以免钢丝摆动造成光杠杆移动并使系统稳定后才能读取数据。并注意槽码的各槽口应相互错开, 防止因钩码倾斜使槽码掉落。

3. 注意保护平面镜和望远镜, 不能用手触摸镜面。

4. 待测钢丝不能扭折, 如果严重生锈和不直, 则必须更换。
5. 光杠杆的支脚  $z_1$ 、 $z_2$  的尖端必须放在 V 形槽的最深处, 此时光杠杆最平衡。支脚应放在圆柱夹头的圆平面处, 而不能放在圆柱形夹头的顶部夹住钢丝的孔或缝中。
6. 望远镜调整要消除视差。
7. 因刻度尺中间刻度为零, 在逐次加砝码时, 如果望远镜中标尺读数由零的一侧变化到另一侧时, 应在读数上加负号。
8. 在读数时应随时注意读数是否有误。这可以由两点来判断: (1) 在相同的  $F$  下, 增重与减重时标尺上的读数应大致相同; (2) 由于应变与应力成正比, 因此每次加  $1.0\text{kg}$  时引起的伸长量 (相邻两个读数误差) 应大致相同。如果离这两点要求偏差过大, 应检验仪器是否正常, 钢丝本身是否直, 光杠杆主杆尖脚  $z_3$  不要与金属丝相碰, 钢丝夹头是否夹紧 (特别是光杠杆的支脚位置及平面镜是否松动), 读数是否正确。
9. 测量  $D$  时应该是标尺到平面的垂直距离。测量时卷尺应该放水平。
10. 实验完成后, 应将砝码取下, 防止钢丝疲劳。

### 【实验数据记录与处理】

光杠杆平面镜到尺子的距离  $D = \underline{\hspace{2cm}}$  mm,  $\Delta D = \underline{\hspace{2cm}}$  mm;

光杠杆前后足尖的垂直距离  $b = \underline{\hspace{2cm}}$  mm,  $\Delta b = \underline{\hspace{2cm}}$  mm;

钢丝长度  $L = \underline{\hspace{2cm}}$  mm,  $\Delta L = \underline{\hspace{2cm}}$  mm。

表 4-1 测量钢丝直径的实验数据表

物理量	1	2	3	4	5	平均值	误差
钢丝直径 $d/\text{mm}$							

表 4-2 钢丝伸长记录表

(单位: cm)

每个砝码的质量  $m = \underline{\hspace{2cm}}$  kg

物理量	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$
加砝码						
减砝码						
加砝码						
减砝码						
平均值						
误差						

### 【思考题】

1. 从光杠杆的放大倍数考虑, 增大  $D$  与减小  $b$  都可以增加放大倍数, 那么它们有何不同?
2. 怎样提高测量微小长度变化的灵敏度? 是否可以增大  $D$  无限制地增大放大倍数? 其放大倍数是否越大越好? 放大倍数增大有无限制?
3. 为什么在测量中, 望远镜中标尺的读数应尽可能在望远镜所在处标尺位置的上下附近?

4. 拉伸法测量钢丝的杨氏弹性模量中需要测量那些物理量？分别用什么仪器测？应估读到哪一位？
5. 什么情况下应用逐差法？逐差法有何优点？
6. 材料相同、粗细长度不同的两根钢丝，它们的杨氏弹性模量是否相同？
7. 在有、无初始负载时，测量钢丝原长  $L$  有何区别？
8. 实验中，不同的长度参量为什么要选用不同的量具仪器（或方法）来测量？

## 实验五 固体和液体的密度测定

### 【实验目的】

1. 学习正确使用物理天平和比重瓶。
2. 掌握用流体静力称衡法和比重瓶法测定形状不规则的固体和液体密度的原理。
3. 测定不规则固体材料和液体的密度。

### 【仪器和用具】

物理天平，待测物体，线绳，烧杯，水，比重瓶。

### 【实验原理】

若一个物体的质量为  $m$ ，体积为  $V$ ，密度为  $\rho$ ，则按密度的定义，有

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5-1)$$

可见，通过测定  $m$  和  $V$  可求出  $\rho$ 。其中  $m$  可用物理天平称量，而物体体积则可根据实际情况，采用不同的测量方法。对于规则几何外形的物体的体积可根据对体积测量精度的要求，选用相应的测长仪器，分别测出各几何尺寸后，利用求积公式而计算出它的体积。对于形状不规则的物体，如小粒状固体、液体，可用下述两种方法测量其体积，从而计算出它的密度。

#### 1. 流体静力称衡法

按照阿基米德定律，浸在液体中的物体要受到向上的浮力，浮力的大小等于物体所排开的液体的重力。先用天平测量被测物体在空气中质量  $m_1$ ，然后将物体浸入水中，称出其在水中的质量  $m_2$ ，如图 5-1 所示，则物体在水中受到的浮力为

$$F = (m_1 - m_2)g \quad (5-2)$$

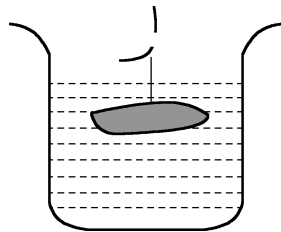


图 5-1 测物体在水中受到的浮力

它应等于全部浸入水中物体所排开的水的重量，即

$$F = \rho_0 V g \quad (5-3)$$

式中， $\rho_0$  为液体的密度（本实验中采用的液体为纯水）， $V$  是排开液体的体积，即物体的体积。所以有

$$(m_1 - m_2)g = \rho_0 V g \quad (5-4)$$

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_0} \quad (5-5)$$

将式（5-5）代入  $\rho = m/V$  中，得

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_0 \quad (5-6)$$

如果将上述物体再浸入密度为  $\rho'$  的待测液体中，称得此时物体的质量为  $m_3$ ，则物体在待测液体中受到的浮力

$$F' = (m_1 - m_3)g = \rho' g V \quad (5-7)$$

由式（5-4）和式（5-7），可得待测液体的密度为

$$\rho' = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \rho_0 \quad (5-8)$$

## 2. 比重瓶法

比重瓶如图 5-2 所示，通常用玻璃制成，瓶塞是用一个中间有毛细管的磨口塞子做成的。如在比重瓶中注满液体，当用瓶塞塞住时，则多余的液体就从毛细管中溢出，这样瓶中液体的体积将保持一定。

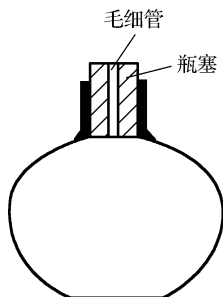


图 5-2 比重瓶

### （1）液体密度的测量

先称出比重瓶的质量  $m_1$ ，然后将纯水注满比重瓶，称得纯水与比重瓶的总质量为  $m_2$ ，则  $m_2 g = m_1 g + \rho_0 V g$ ，因此，可以推出比重瓶的容积

$$V = (m_2 - m_1) / \rho_0 \quad (5-9)$$

如果再将待测密度为  $\rho'$  的液体注入比重瓶，再称量得出被测液体和比重瓶的质量为  $m_3$ ，则  $\rho' = (m_3 - m_1) / V$ 。将式（5-9）代入此公式得

$$\rho' = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \rho_0 \quad (5-10)$$

### （2）粒状固体密度的测量

比重瓶内盛满纯水，用天平称出瓶和水的质量  $m_1$ ，称出粒状固体的质量为  $m_2$ ，称出在装满水的瓶内投入粒状固体后的总质量为  $m_3$ ，则被测粒状固体排出比重瓶内水的质量是  $m = m_1 + m_2 - m_3$ ，而排出水的体积就是质量为  $m_2$  的粒状固体的体积，所以待测粒状固体的密度为

$$\rho = \frac{m_2}{m_1 + m_2 - m_3} \rho_0 \quad (5-11)$$

当然，要求所测粒状固体不能溶于水，其大小应保证能投入比重瓶内。

### 【实验内容与步骤】

1. 调整物理天平：调节水平；调节零点；练习使用方法。

2. 用流体静力称衡法测固体的密度。

(1) 用细线拴住物块，置于天平的左面挂钩上称出其在空气中的质量  $m_1$ 。

(2) 把盛有大半杯水的杯子放在天平左边的托盘上，然后将用细线挂在天平左边小钩上的物块全部浸没在水中（注意不要让物体接触杯子），称出其在水中的质量  $m_2$ 。

(3) 查表记录室温下纯水的密度  $\rho_0$ 。

(4) 将测量数据记录在表 5-1 中，按式 (5-6) 计算出物体的密度并计算出测量误差，按标准形式写出测量结果。

3. 用比重瓶法测量物体的密度

(1) 测量液体的密度

① 洗净、烘干比重瓶（注意瓶内外都要干燥），称出其质量  $m_1$ 。

② 采用吸管将纯水充满比重瓶，塞上塞子，擦去溢出的水（注意瓶内不能有残留的水泡），用天平称出比重瓶和纯水的总质量  $m_2$ 。

③ 倒出比重瓶中的纯水、烘干，然后再将被测液体注满比重瓶，称出比重瓶和液体的总质量  $m_3$ 。

④ 由式 (5-10) 计算出液体的密度。

(2) 测量粒状物体的密度

① 用天平称出盛满纯水的比重瓶的质量  $m_1$ 。

② 用天平称出固体颗粒的质量  $m_2$ 。

③ 将颗粒状物体投入盛满纯水的比重瓶内，擦去溢出的水，称出瓶、水和颗粒物体的总质量  $m_3$ 。

④ 由式 (5-11) 算出被测物体的密度。



## 【实验数据记录与处理】

## 1. 用流体静力称衡法测固体密度

表 5-1 实验数据表

待测固体名称：\_\_\_\_，水温  $t =$  \_\_\_\_\_  $^{\circ}\text{C}$ ，天平感量：\_\_\_\_\_

待测物体在空气中的质量 $m_1/\text{g}$	
待测物体在纯水中的质量 $m_2/\text{g}$	
纯水在 $t$ 时的密度 $\rho_0/(\text{kg}/\text{m}^3)$	

$$\text{待测物体密度 } \rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_0 = \text{_____}。$$

$$\text{相对不确定度 } E_p = u_c(\rho) = \sqrt{\left[ \frac{m_2}{m_1(m_1 - m_2)} \right]^2 u_B^2(m_1) + \left( \frac{1}{m_1 - m_2} \right)^2 u_B^2(m_2)} = \text{_____}。$$

$$\text{不确定度 } u_c(\rho) = \rho \cdot E_p。$$

$$\text{测量结果为 } \rho \pm u_c(\rho) = \text{_____}。$$

## 2. 用比重瓶法测量液体和颗粒物体的密度

自拟表格记录测量液体和颗粒物体的有关数据，并计算其密度和不确定度，按标准形式写出测量结果。

## 【思考题】

1. 使用物理天平应注意哪几点？怎样消除天平两臂不等而造成的系统误差？
2. 分析造成本实验误差的主要原因有哪些。
3. 如何用流体静力称衡法来测定密度比水的密度小的固体的密度？

## 实验六 受迫振动

## 【实验目的】

1. 掌握共振仪的结构和使用方法。
2. 测量观察电磁阻尼对摆轮的振幅与振动频率之间的影响。
3. 学会测定摆轮受迫振动的幅频特性和相频特性曲线。

## 【仪器和用具】

伯尔共振仪。

## 【实验原理】

### 1. 受迫振动

物体在周期性外力的持续作用下进行的振动，称为受迫振动。

根据转动定理，有

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = -k\theta - b \frac{d\theta}{dt} + M_0 \cos \omega t \quad (6-1)$$

式中， $J$  为摆轮的转动惯量， $M_0$  为驱动力矩的幅值， $\omega$  为驱动力矩的角频率。令

$$\omega^2 = \frac{k}{J}, \quad 2\delta = \frac{b}{J}, \quad m = \frac{M_0}{J} \quad (6-2)$$

则式 (6-1) 可写为

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\delta \frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2 \theta = m \cos \omega t \quad (6-3)$$

式中， $\delta$  为阻尼系数， $\omega_0$  为摆轮系统的固有频率。在小阻尼条件下，该方程的通解为

$$\theta = \theta_a e^{-\delta t} \cos(\omega_a t + \alpha) + \theta_b \cos(\omega t + \varphi) \quad (6-4)$$

此解表明摆轮的受迫振动包含两个分振动：第一项为阻尼振动，随时间的推移而逐渐消失，反映了受迫振动的暂态行为，与驱动力无关；第二项表示与驱动力频率相同且振幅为  $\theta_b$  的周期振动。

可见，摆轮的受迫振动在开始时比较复杂，但经过不长的时间后，阻尼振动衰减到可以忽略不计，受迫振动达到稳定状态。这时，受迫振动变为简谐振动，有

$$\theta = \theta_b \cos(\omega t + \varphi) \quad (6-5)$$

### 2. 共振

由极值条件  $\frac{\partial \theta_b}{\partial \omega} = 0$  可得出，当驱动力矩的角频率为  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$  时，受迫振动的振幅达到最大值，产生共振。共振时的角频率  $\omega_r$ 、振幅  $\theta_r$  和相位差  $\varphi_r$  分别为

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} \quad (6-6)$$

$$\theta_r = \frac{m}{2\delta \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} \quad (6-7)$$

$$\varphi_r = \arctan \left( \frac{-\sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}}{\delta} \right) \quad (6-8)$$

由以上各式可以看出，阻尼系数  $\delta$  越小，共振角频率  $\omega_r$  越接近于系统的固有频率  $\omega_0$ ，振幅  $\theta_r$  也越大，振动的角位移的相位滞后于驱动力矩的相位越接近于  $\frac{\pi}{2}$ 。

### 3. 阻尼系数 $\delta$ 的测量

由振动系统做阻尼振动时的振幅比值求阻尼系数  $\delta$ 。

(1) 振动系统做阻尼振动时，对应的振动方程和方程的解为

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\delta\frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2\theta = 0 \quad (6-9)$$

$$\theta = \theta_a e^{-\delta t} \cos(\omega_a t + \alpha) \quad (6-10)$$

$$\omega_a = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} \quad (6-11)$$

对相隔  $n$  个周期的两振幅之比取自然对数，则有

$$\ln \frac{\theta_0}{\theta_n} = \ln \frac{\theta_a e^{-\delta t}}{\theta_a e^{-\delta(t+nT)}} = n\delta T \quad (6-12)$$

可利用式 (6-12) 求出  $\delta$  值，其中  $n$  为阻尼振动的周期数， $\theta_0$  为计时开始时振动的振幅， $\theta_n$  为第  $n$  次振动时的振幅， $T$  为阻尼振动的周期。

(2) 由受迫振动系统的幅频特性曲线求阻尼系数  $\delta$ （只适用于弱阻尼  $\delta^2 \ll \omega_0^2$  的情况）

由幅频特性可以看出，在弱阻尼  $\delta^2 \ll \omega_0^2$  情况下，共振峰附近  $\frac{\omega}{\omega_0} \approx 1$ ， $\omega + \omega_0 \approx 2\omega_0$ 。

由此可得

$$\frac{\theta_b}{\theta_r} = \frac{2\delta\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}} \approx \frac{\delta}{\sqrt{(\omega - \omega_0)^2 + \delta^2}} \quad (6-13)$$

当  $\theta_b = \frac{\theta_r}{\sqrt{2}}$  时，由式 (6-13) 可解得

$$\omega - \omega_0 \approx \pm\delta \quad (6-14)$$

在幅频特性曲线上可直接读出  $\theta_b = \frac{\theta_r}{\sqrt{2}}$  处对应的两个横坐标  $\frac{\omega_+}{\omega_0}$  和  $\frac{\omega_-}{\omega_0}$ ，从而可得

$$\omega_+ - \omega_- \approx 2\delta \quad (6-15)$$

### 4. 频闪法测量相位差 $\varphi$

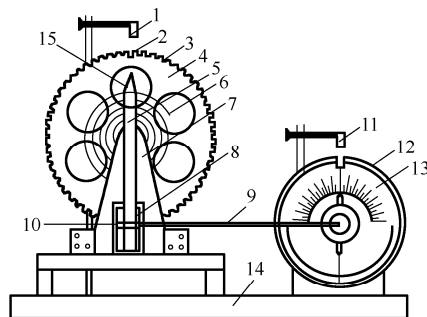
要测量出振动系统的相频特性，必须在稳定受迫振动下测量出摆轮振动的角位移与驱动力矩之间的相位差  $\varphi$ 。共振仪的机电系统使得仪器实现了在稳定振动的状态下，摆轮上的长凹槽经过光电门的时刻，转盘上的指针所指的角度即为相位差  $\varphi$ ，但共振仪工作时转盘旋转很快，实验者难以读出此时刻的  $\varphi$  值，因此采用频闪法实现对相位差  $\varphi$  的测量。

仪器配置了一个闪光灯，闪光信号受光电门的控制，每当摆轮上的长凹槽经过光电门时，下光电管产生的光电脉冲可以触发闪光灯。借助于闪光瞬间，转盘上的强反光指针被照亮，由于人眼的视觉暂留作用，光指针所在处的角度值就可以方便地读出。该显示读数的方法称为频闪法。共振仪在受迫振动达到稳定后，闪光频率是转盘旋转频率的两倍，这与转盘的同

一直径上的两个光指针相匹配，所以在闪光灯照射下，看起来光指针好像一直停留在同一位置上显示  $\varphi$  值。

玻耳共振仪简介如下。

本实验使用的玻耳共振仪由共振仪和控制仪两部分组成，并用电缆互连。共振仪的结构如图 6-1 所示。



1—光电门；2—长凹槽；3—短凹槽；4—铜质摆轮；5—摇杆；6—蜗卷弹簧；  
7—支架；8—阻尼线；9—连杆；10—摇杆调节螺丝；11—光电门；  
12—角度盘；13—有机玻璃转盘；14—底座；15—外端夹持螺钉

图 6-1 玻耳共振仪的共振仪

振动系统由铜质圆形摆轮与蜗卷弹簧构成，弹簧的一端固定在机架支柱上，另一端与摆轮轴相连，在弹簧弹性力作用下，摆轮可绕轴自由往复振动。外激励是由转速十分稳定的可调电机的偏心轴通过连杆和摆杆加到振动系统上的。当电机匀速转动时，可视为一种简谐激励。若改变电机转速，就相当于改变激励的周期。电磁阻尼由阻尼线圈产生，调节线圈电流可以改变电磁铁气隙中的磁场，以达到改变阻尼力矩的作用。角度读数盘上方处也装有光电门，与控制电路相连接，可以用来测量强迫力矩的周期。

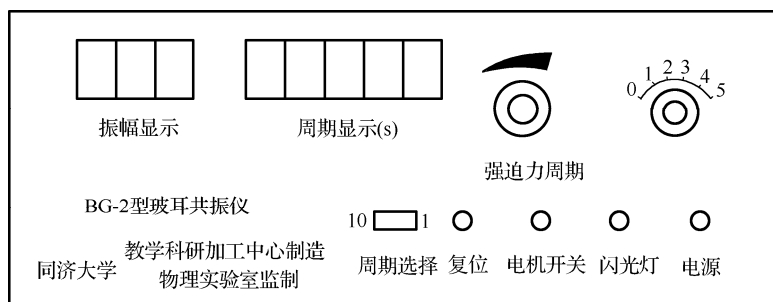


图 6-2 玻耳共振仪的控制仪前面板

玻耳共振仪的控制仪前面板如图 6-2 所示。左边是振幅显示窗，显示三位数字的摆轮振幅；右边是周期显示窗，显示 5 位数字振动周期，精度为  $10^{-3}\text{s}$ 。“摆轮、强迫力”和“周期选择”开关，分别用来测量摆轮强迫力矩的 1 次或者 10 次周期所需的时间。电机转速调节旋钮用来改变强迫力周期，它是通过精确改变电机转速来达到的，其精度仅供参考。阻尼选择开关用来改变阻尼线圈直流电位的大小，实验时选何挡量程位置根据实际情况而定，“5”阻尼

最大，“0”最小，一般避免置于“0”位置。电机开关用来控制电机转动，当测量阻尼系数和摆轮固有频率 $\omega$ 与振幅关系时，电机开关处于断状态。

### 【实验内容与步骤】

1. 测量自由振动时摆轮振幅  $\theta$  与振动频率  $\omega_0$  的对应关系

(1) 将电机有机玻璃转盘白线转到水平位置, 以使摆轮白线居中。

(2) 按下电源开关, 阅读屏幕所显示的按键说明。按“确认”键, 进入系统模式选择, 选中“联网模式”, 确认。系统进入“实验步骤”菜单, 选中“自由振荡”, 确认。系统进入自由振荡(阻尼 0)待测状态。

(3) 用手将摆轮拨转接近半圈 (接近  $180^\circ$ ), 松手, 摆轮做自由振动, 紧接着按键, 使系统进入自动测量状态。待自动测量结束后, 查询记录数据。

2. 测量阻尼振动时的振幅比值, 并求阻尼系数  $\delta$

(1) 将系统返回“实验步骤”菜单，选中“阻尼振荡”，确认。系统进入“阻尼选择”菜单，选中“阻尼1”，确认。系统进入阻尼振动（阻尼1）待测状态。

(2) 用手将摆轮拨转接近半圈 (接近  $180^\circ$ ), 松手, 摆轮做自由振动, 紧接着按键, 使系统进入自动测量状态。待自动测量结束后, 查询记录数据。

3. 测定受迫振动时的幅频特性和相频特性, 并求阻尼系数  $\delta$

(1) 将系统返回“实验步骤”菜单，选中“强迫振荡”，确认。系统进入受迫振动待测状态，打开电机，摆轮做受迫振动。

(2) 待自动测量结束, 记录相关数据。再按住闪光灯按钮, 利用视觉暂留, 从电机度盘上测量记录相位差。

(3) 选中周期, 将计时由 10 个周期退回 1 个周期, 以便观察。微调强迫力周期电位器, 改变电机转速, 重复 (2) ~ (4) 过程。测出另一组数据。

(4) 反复重复 (2) ~ (4) 过程, 直到测出完整的幅频曲线和相频曲线。

### 【实验数据记录与处理】

(1) 测量所得的实验数据如表 6-1~表 6-4 所示。

表 6-1 自由振动时摆轮振幅  $\theta$  与振动频率  $\omega_0$  的对应关系

[illegible]

表 6-2 阻尼振动时的振幅比值的原始数据表

摆轮振幅 $\theta / ^\circ$	振动周期 $T \times 10 / \text{s}$	摆轮振幅 $\theta / ^\circ$	振动周期 $T \times 10 / \text{s}$

表 6-3 阻尼振动时的振幅比值的数据处理表

摆轮振幅 $\theta / ^\circ$				$\ln(\theta_i / \theta_{i+5}) = S \delta T$
$\theta_0$		$\theta_5$		
$\theta_1$		$\theta_6$		
$\theta_2$		$\theta_7$		
$\theta_3$		$\theta_8$		
$\theta_4$		$\theta_9$		
平均值				

表 6-4 受迫振动时的幅频与相频特性实验数据表

摆轮振幅 $\theta / ^\circ$	振动周期 $T \times 10 / \text{s}$	相位差 $\varphi_{\text{测量}}$	查表 6-1 得 $T_0 / \text{s}^{-1}$	$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{T_0}{T}$

（2）根据表 6-4 所示数据，绘制受迫振动系统的幅频和相频特性曲线，并分析。

## 实验七 弦振动实验

### 【实验目的】

1. 了解弦振动形成驻波的机理、条件与特征。
2. 测量均匀弦线上横波的传播速度及均匀弦线的线密度。

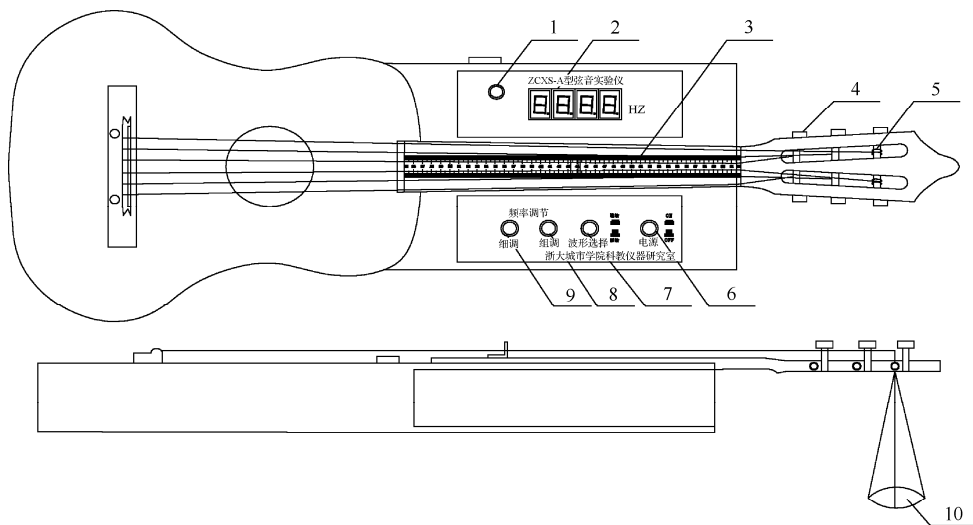
### 【仪器和用具】

ZCXS—A 型弦音实验仪。

### 【实验原理】

实验装置如图 7-1 所示。

吉他上有 4 支钢质弦线，中间两支用来测定弦线张力，旁边两支用来测定弦线线密度。实验时，弦线 3 与音频信号源接通。这样，通有正弦交变电流的弦线在磁场中就受到周期性的安培力的激励。根据需要，可以调节频率选择开关和频率微调旋钮，从显示器上读出频率。移动劈尖的位置，可以改变弦线长度，并可适当移动磁钢的位置，使弦振动调整到最佳状态。



1—接线柱插孔；2—频率显示；3—钢质弦线；4—张力调节旋钮；5—弦线导轮；6—电源开关；7—波形选择开关；8—频段选择开关；9—频率微调旋钮；10—砝码盘

图 7-1 实验装置示意图

根据实验要求：挂有砝码的弦线可用来间接测定弦线线密度或横波在弦线上的传播速度；利用安装在张力调节旋钮上的弦线，可间接测定弦线的张力。

弦线通过导轮与砝码连接，改变砝码可以改变弦线的张力。弦线接通正弦信号，通有交

变电流，在磁钢产生的磁场中，弦线受安培力作用产生正弦振动，此振动向弦两边传播，在劈尖与吉他骑码两处反射后反向传播，当弦长是半波长的整数倍时，形成稳定的驻波。

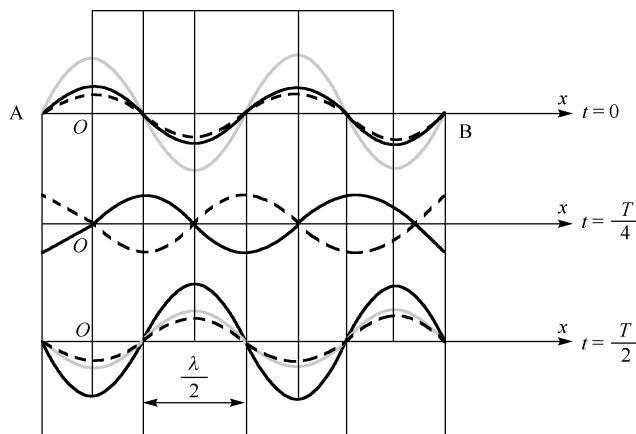


图 7-2 波形示意图

如图 7-1 所示，实验时，将弦线 3（钢丝）绕过弦线导轮 5 与砝码盘 10 连接，并通过接线柱 4 接通正弦信号源。在磁场中，通有电流的金属弦线会受到磁场力（称为安培力）的作用，当弦线上接通正弦交变电流时，则它在磁场中所受的与磁场方向和电流方向均为垂直的安培力也随之发生正弦变化，移动劈尖改变弦长，当弦长是半波长的整倍数时，弦线上便会形成驻波。移动磁钢的位置，将弦线振动调整到最佳状态，使弦线形成明显的驻波。此时我们认为磁钢所在处对应的弦为振源，振动向两边传播，在劈尖与吉他骑码两处反射后又沿各自相反的方向传播，最终形成稳定的驻波。

考察与张力调节旋钮相连时的弦线 3 时，可调节张力调节旋钮改变张力，使驻波的长度产生变化。

为了研究问题的方便，当弦线上最终形成稳定的驻波时，可以认为波动是从骑码端发出的，沿弦线朝劈尖端方向传播，称为入射波，再由劈尖端反射沿弦线朝骑码端传播，称为反射波。入射波与反射波在同一条弦线上沿相反方向传播时将相互干涉，移动劈尖到合适位置，弦线上就会形成驻波。这时，弦线上的波被分成几段，形成波节和波腹。如图 7-2 所示。

设图中的两列波是沿  $x$  轴相向方向传播的振幅相等、频率相同、振动方向一致的简谐波。向右传播的用细实线表示，向左传播的用细虚线表示，当传至弦线上相应点时，位相差为恒定时，它们就合成驻波（用粗实线表示）。由图 7-2 可见，两个波腹或波节间的距离都等于半个波长，这可从波动方程推导出来。

下面用简谐波表达式对驻波进行定量描述。设沿  $x$  轴正方向传播的波为入射波，沿  $x$  轴负方向传播的波为反射波，取它们振动相位始终相同的点作为坐标原点“ $O$ ”，且在  $x=0$  处，振动质点向上达最大位移时开始计时，则它们的波动方程分别为

$$Y_1 = A \cos 2\pi(ft - x/\lambda)$$

$$Y_2 = A \cos 2\pi(ft + x/\lambda)$$



式中,  $A$  为简谐波的振幅,  $f$  为频率,  $\lambda$  为波长,  $x$  为弦线上质点的坐标位置。两波叠加后的合成波为驻波, 其方程为

$$Y_1 + Y_2 = 2A \cos 2\pi(x/\lambda) \cos 2\pi ft \quad (7-1)$$

由此可见, 入射波与反射波合成后, 弦上各点都在以同一频率做简谐振动, 它们的振幅为  $|2A \cos 2\pi(x/\lambda)|$ , 只与质点的位置  $x$  有关, 与时间无关。

由于波节处振幅为零, 即  $|\cos 2\pi(x/\lambda)| = 0$

$$2\pi x/\lambda = (2k+1)\pi/2 \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

可得波节的位置为

$$x = (2k+1)\lambda/4 \quad (7-2)$$

而相邻两波节之间的距离为

$$x_{k+1} - x_k = [2(k+1)+1]\lambda/4 - (2k+1)\lambda/4 = \lambda/2 \quad (7-3)$$

又因为波腹处的质点振幅为最大, 即  $|\cos 2\pi(x/\lambda)| = 1$

$$2\pi x/\lambda = k\pi \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

可得波腹的位置为

$$x = k\lambda/2 = 2k\lambda/4 \quad (7-4)$$

这样相邻的波腹间的距离也是半个波长。因此, 在驻波实验中, 只要测得相邻两波节 (或相邻两波腹) 间的距离, 就能确定该波的波长。

在本实验中, 由于弦的两端是固定的, 故两端点为波节, 所以, 只有当均匀弦线的两个固定端之间的距离 (弦长) 等于半波长的整数倍时, 才能形成驻波, 其数学表达式为

$$L = n\lambda/2 \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

由此可得沿弦线传播的横波波长为

$$\lambda = 2L/n \quad (7-5)$$

式中,  $n$  为弦线上驻波的段数, 即半波数。

根据波动理论, 弦线横波的传播速度为

$$V = (T/\rho)^{1/2} \quad (7-6)$$

即

$$T = \rho V^2$$

式中,  $T$  为弦线中张力,  $\rho$  为弦线单位长度的质量, 即线密度。

根据波速、频率及波长的普遍关系式  $V = f\lambda$ , 将式 (7-5) 代入可得

$$V = 2Lf/n \quad (7-7)$$

再由式 (7-6) 和式 (7-7) 可得

$$\rho = T(n/2Lf)^2 \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (7-8)$$

即

$$T = \rho(2Lf/n)^2 \quad (n=1,2,3,\cdots)$$

由式(7-8)可知,当给定  $T$ 、 $\rho$ 、 $L$  时,频率  $f$  只有满足该式关系才能在弦线上形成驻波。

当金属弦线在周期性的安培力激励下发生共振干涉形成驻波时,通过骑码的振动激励共鸣箱的薄板振动,薄板的振动引起吉他音箱的声振动,经过释音孔释放,我们能听到相应频率的声音,当用间歇脉冲激励时尤为明显。

### 【实验内容与步骤】

1. 频率  $f$  一定,测量两种弦线的线密度  $\rho$  和弦线上横波传播速度(弦线  $a$ 、 $a'$  为同一种规格,  $b$ 、 $b'$  为另一种规格)。

测弦线  $a'$  的线密度:波形选择开关 7 选择连续波位置,将信号发生器输出插孔 1 与弦线  $a'$  接通。选取频率  $f=240\text{Hz}$ ,张力  $T$  由挂在弦线一端的砝码及砝码钩产生,以  $100\text{g}$  砝码为起点逐渐增加至  $180\text{g}$  为止。在各张力的作用下调节弦长  $L$ ,使弦线上出现  $n=2$ ,  $n=3$  个稳定且明显的驻波段。记录相应的  $f$ 、 $n$ 、 $L$  的值,由公式  $\rho = T(n/2Lf)^2$  计算弦线的线密度  $\rho$ 。

弦线上横波传播速度  $V=2Lf/n$ ,作  $T-\bar{V}^2$  拟合直线,由直线的斜率亦可求得弦线的线密度 ( $T=\rho V^2$ )。

2. 张力  $T$  一定,测量弦线的线密度  $\rho$  和弦线上横波传播速度  $V$ 。

在张力  $T$  一定的条件下,改变频率  $f$  分别为  $200\text{Hz}$ 、 $220\text{Hz}$ 、 $240\text{Hz}$ 、 $260\text{Hz}$ 、 $280\text{Hz}$ ,移动劈尖,调节弦长  $L$ ,仍使弦线上出现  $n=2$ ,  $n=3$  个稳定且明显的驻波段。记录相应的  $f$ 、 $n$ 、 $L$  的值,由式(7-7)可间接测量弦线上横波的传播速度  $V$ 。

### 【实验数据记录与处理】

砝码钩的质量  $m = \underline{\hspace{2cm}}$  kg,重力加速度  $g=9.8\text{m/s}^2$ 。

1. 频率  $f$  一定,测弦线的线密度  $\rho$  和弦线上横波传播速度  $V$  弦线  $a'$  线密度的测定:

	$f=240\text{Hz}$									
$T(9.8\text{N})$	0.100+m		0.120+m		0.140+m		0.160+m		0.180+m	
驻波段数 $n$	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
弦线长 $L/(10^{-2}\text{m})$										
线密度 $\rho = T(n/2Lf)^2 / (\text{kg/m})$										
平均线密度 $\bar{\rho} / (\text{kg/m})$										
传播速度 $V=2Lf/n / (\text{m/s})$										
平均传播速度 $\bar{V} / (\text{m/s})$										
$\bar{V}^2 / (\text{m/s})^2$										

作  $T-\bar{V}^2$  拟合直线,由直线的斜率  $\Delta(\bar{V}^2)/\Delta T$  求弦线的线密度 ( $T=\rho V^2$ )。

2. 张力  $T$  一定,测量弦线的线密度  $\rho$  和弦线上横波传播速度  $V$ 。

	$T = (0.150 + m) \times 9.8 \text{ N}$									
频率 $f/\text{Hz}$	200		220		240		260		280	
驻波段数 $n$	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
弦线长 $L/10^{-2}\text{m}$										
横波速度 $V = 2Lf/n(\text{m/s})$										
平均横波速度 $\bar{V} =$ _____ $\text{m/s}$ , $\bar{V}^2 =$ _____ $(\text{m/s})^2$										
线密度 $\rho = \frac{T}{\bar{V}^2} =$ _____ $\text{kg/m}$										

### 【注意事项】

1. 在线柱 4 与弦线连接时, 应避免与相邻弦线短路。
2. 改变挂在弦线一端的砝码后, 要使砝码稳定后再测量。
3. 磁钢不能处于波节下位置。要等波稳定后, 再记录数据。

## 实验八 声速的测量

### 【实验目的】

1. 学习用振幅极值法和相位比较法测量超声波在空气中的传播速度。
2. 加深对相关仪器（示波器、信号发生器、频率计等）使用知识的掌握。
3. 学会用逐差法进行数据处理。

### 【实验仪器】

信号源, 压电陶瓷换能器, 示波器。

### 【实验原理】

声波是一种在弹性媒质中传播的机械波, 振动频率在  $20 \sim 20000 \text{ Hz}$  范围内的声波称为可闻声波, 频率低于  $20 \text{ Hz}$  的声波称为次声波, 频率高于  $20000 \text{ Hz}$  的声波称为超声波。声波的波长、频率、强度、传播速度等是声波的特性。对这些量的测量是声学技术的重要内容。如声速的测量在声波定位、探伤、测距中有着广泛的应用。测量声速最简单的方法之一是利用声速与振动频率  $f$  和波长  $\lambda$  之间的关系来进行的。由于超声波具有波长短、能定向传播等特点, 所以在超声波段进行声速测量是比较方便的。本实验就是测量超声波在空气中的传播速度。超声波的发射和接收一般通过电磁振动与机械振动的相互转换来实现, 最常见的是利用压电效应和磁致伸缩效应。在实际应用中, 在超声波测距、定位测液体流速、测材料弹性模量、测量气体温度的瞬间变化等方面, 超声波传播速度都有重要意义。

#### 1. 压电陶瓷换能器

本实验采用压电陶瓷换能器来实现声压和电压之间的转换。它主要由压电陶瓷环片、轻

金属铅（做成扬声器形状，增加辐射面积）和重金属（如铁）组成。压电陶瓷片由多晶体结构的压电材料锆钛酸铅制成。在压电陶瓷片的两个底面上加上正弦交变电压，它就会按正弦规律发生纵向伸缩，从而发出超声波。同样压电陶瓷可以在声压的作用下把声波信号转换为电信号。压电陶瓷换能器在声-电转换过程中，信号频率保持不变。

如图 8-1 所示， $S_1$  作为声波发射器，它把电信号转换为声波信号向空间发射。 $S_2$  是信号接收器，它把接收到的声波信号转换为电信号供观察。其中  $S_1$  是固定的，而  $S_2$  可以左右移动。

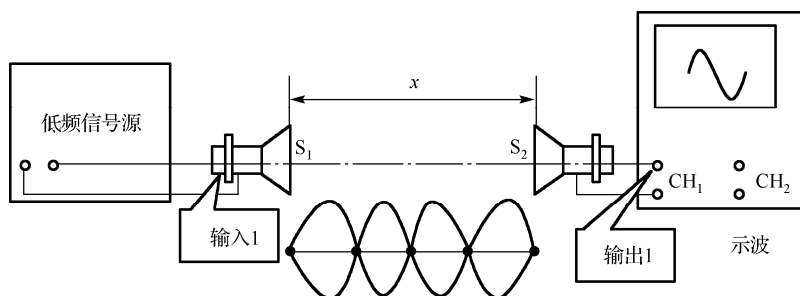


图 8-1 共振干涉法实验装置图

## 2. 共振法测量波长 $\lambda$

由声源  $S_1$  发出的声波（频率为  $f$ ），经介质（空气）传播到  $S_2$ ， $S_2$  在接收声波信号的同时反射部分声波信号。如果接收面（ $S_2$ ）与发射面（ $S_1$ ）严格平行，入射波即在接收面上垂直反射，入射波与反射波相干涉形成驻波。反射面处是位移的波节，声压的波腹。改变接收器与发射源之间的距离  $x$ ，在一系列特定的距离上，空气中出现稳定的驻波共振现象。此时  $x$  等于半波长的整数倍，驻波的幅度达到极大；同时，在接收面上的声压波腹也相应地达到极大值。通过压电转换，产生的电信号的电压值也最大（示波器显示波形的幅值最大）。因此，若保持频率不变，通过测量相邻两次接收信号达到极大值时接收面之间的距离  $\Delta x$ ，即可得到该波的波长  $\lambda$ （ $\lambda = 2\Delta x$ ），并用  $v \approx f \cdot \lambda$  计算出声速。

## 3. 相位比较法测量波长 $\lambda$

声源  $S_1$  发出声波后，在其周围形成声场，声场在介质中任一点的振动相位是随时间而变化的，但它和声源振动的位相差  $\Delta\phi$  不随时间变化。

设声源方程可写成  $y = y_0 \cos \omega t$ ，距声源  $x$  处  $S_2$  接收到的振动为  $y' = y'_0 \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$ ，两处振动的位相差  $\Delta\phi = \omega \frac{x}{v}$ ，若把两处振动分别输入到示波器  $x$  轴和  $y$  轴（如图 8-2 所示），那么当  $x = n\lambda$ ，即  $\Delta\phi = 2n\pi$  时，合振动为一斜率为正的直线。当  $x = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$ ，即  $\Delta\phi = (2n+1)\pi$  时，合振动为一斜率为负的直线。当  $x$  为其他值时，合振动为椭圆，如图 8-3 所示。移动  $S_2$ ，当其合振动为直线的图形斜率正、负更替变化一次， $S_2$  移动的距离  $\Delta x = (2n+1)\lambda/2 - n\lambda = \lambda/2$ ，则  $\lambda = 2\Delta x$ 。

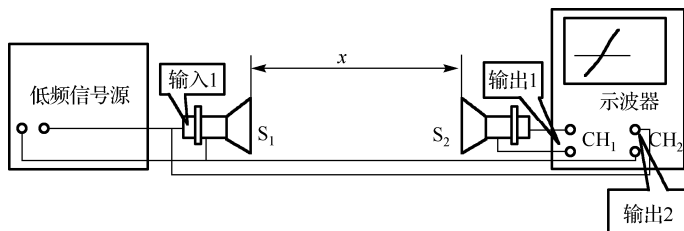


图 8-2 相位比较法实验装置图

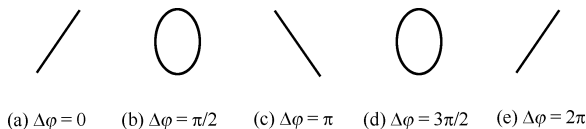


图 8-3 同频率垂直振动合成的李萨如图形

## 【实验内容与步骤】

### 1. 准备与声速测量系统的连接

- (1) 示波器 POWER 开关置 ON，调节亮度 (INTENSITY) 和聚焦 (FOCUS)，使波形清晰。
- (2) 触发源 (TRIG. SOURCE) 开关置 INT，触发方式 (TRIG. MODE) 开关置 AUTO，触发电平 (TRIG. LEVEL) 右旋至锁定 (LOCK) 状态。
- (3) 声速测量时，专用信号源、测试仪、示波器之间的连接方法如图 8-4 所示。

### 2. 谐振频率的调节

- (1) 将测试方法设置到连续方式，按图 8-4 所示连好线。按下 CH<sub>1</sub> 开关，调节示波器，能清楚地观察到同步的正弦波信号。

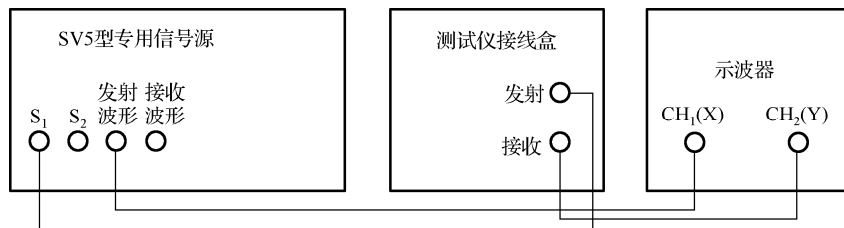


图 8-4 共振干涉法、相位法测量仪器连接方法

- (2) 调节专用信号源上的“发射强度”旋钮，使其输出电压在  $20V_{p-p}$  左右，然后将换能器测试仪接线盒上的接收端接至示波器，将两声能转换探头靠近，按下 CH<sub>2</sub> 开关，调整信号频率，观察接收波的电压幅度变化，在某一频率点处 (34.5~39.5kHz 之间，因不同的换能器或介质而异) 电压幅度最大，此频率即是压电换能器 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 相匹配的频率点。

- (3) 改变 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 的距离，使示波器的正弦波振幅最大，再次调节正弦信号频率，直至示波器显示的正弦波振幅达到最大值，记录此频率  $f$ 。

3. 共振干涉法测声速

- (1) 将 S<sub>2</sub> 移动接近 S<sub>1</sub> 处（注意不要接触），再缓缓地移动 S<sub>2</sub>，当示波器上出现振幅信号时，记下位置 x<sub>0</sub>。
- (2) 由近而远改变接收器 S<sub>2</sub> 的位置，可观察到正弦波形发生周期性的变化，逐个记下振幅最大的 x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, ..., x<sub>16</sub> 共 16 个点。

4. 相位比较法测声速

- (1) 在共振干涉法实验的基础上，将示波器的 X-Y 控制键按下，即可观察到椭圆。
- (2) 使 S<sub>2</sub> 稍靠拢 S<sub>1</sub>，然后再慢慢地移离 S<sub>2</sub>，当示波器屏上出现斜率为正的直线时，记下 S<sub>2</sub> 的位置 x'<sub>0</sub>。
- (3) 移动 S<sub>2</sub>，依次记下示波器上斜率负、正变化的直线出现时 S<sub>2</sub> 的对应位置 x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, ..., x<sub>16</sub>。
- (4) 记下实验室温度 t。

【实验数据记录与处理】

声波传输理论值计算公式为

$$v_{\text{theory}} = 331.30 \times \sqrt{1 + t / T_0}$$
$$T_0 = 273.5\text{K}$$

声波传输实验值计算公式为

$$v_{\text{exp}} = f \lambda$$

表 8-1 共振干涉法测声速数据表

测量次数 <i>i</i>	位置 <i>x<sub>i</sub></i> /mm	测量次数 <i>i</i>	位置 <i>x<sub>i</sub></i> /mm	<i>L<sub>i</sub></i> = <i>x<sub>i+8</sub></i> - <i>x<sub>i</sub></i> /mm
1		9		
2		10		
3		11		
4		12		
5		13		
6		14		
7		15		
8		16		

共振干涉法测声速数据处理：

实验频率 *f* = \_\_\_\_\_，实验室温度 *t* = \_\_\_\_\_；

Δ*f*<sub>|*x*</sub> = \_\_\_\_\_， Δ*x*<sub>|*f*</sub> = \_\_\_\_\_；

*v*<sub>theory</sub> = \_\_\_\_\_， *v*<sub>exp</sub> = \_\_\_\_\_， 误差 Δ*v* = \_\_\_\_\_。

### 【注意事项】

1. 测量时应调节螺杆使  $S_2$  移动, 请避免空回误差。
2. 使用时, 应避免信号源的信号输出端短路。

## 实验九 双孔应变传感器——称重实验

### 【实验目的】

1. 比较各桥路间的输出关系。
2. 几种桥路的性能比较。
3. 桥路电路的实际应用。

### 【仪器和用具】

直流稳压电源、双孔悬臂梁称重传感器、半导体应变片、应变式传感器实验模块、称重砝码 4 个 (20g/个)、数字电压表、导线。

### 【实验原理】

本实验选用的是标准商用双孔悬臂梁式称重传感器, 4 个特性相同的应变片贴在如图 9-1 所示的位置, 弹性体的结构决定了  $R_1$  和  $R_3$ 。 $R_2$  和  $R_4$  的受力方向分别相同, 因此将它们串接就形成了差动电桥。

当弹性体受力时, 根据电桥的加减特性, 其输出电压为

$$U = \frac{E}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = 4 \times \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

### 【实验内容与步骤】

1. 观察称重传感器弹性体结构及贴片位置, 连接主机与实验模块的电源连接线, 开启主机电源, 调节放大器调零电位器, 使无负载时的称重传感器输出为零。

2. 接好传感器测试系统线路, 称重传感器工作电压选用  $\pm 4V$ , 差动放大器增益为最大 (100 倍), 输出端接电压表。调节电桥 WD 调零电位器, 使无负载时的称重传感器输出为零。

3. 逐步将砝码放上称重平台, 调节增益电位器, 使 V0 端输出电压与所称质量呈一比例关系, 记录  $W(g)$  与  $U(mV)$  的对应值, 并填入表 9-1。

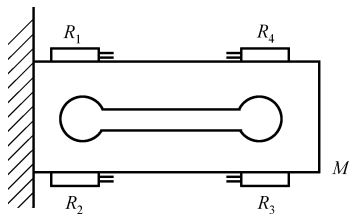


图 9-1 双孔悬臂梁称重传感器

- 4. 记录  $W$  与  $U$  值，并作  $W-U$  曲线，进行灵敏度、线性度与重复性的比较。
- 5. 与双平行悬臂梁组成的全桥进行性能比较。

【实验数据记录与处理】

表 9-1 记录  $W$  与  $U$  的对应数据表

$W/g$										
$U/mV$										

【注意事项】

- 1. 称重传感器的激励电压请勿随意提高。
- 2. 注意保护传感器的引线及应变片，使之不受损伤。

实验十 集成霍尔传感器特性与简谐振动实验

【实验目的】

- 1. 了解集成开关型霍尔传感器的特性，掌握集成霍尔传感器的使用方法。
- 2. 观察弹簧振子的运动规律，测出弹簧振子的劲度系数。
- 3. 用图解法求弹簧的有效质量。
- 4. 学习用霍尔传感器测量弹簧振子的振动周期。
- 5. （选做）测量集成开关型霍尔传感器的特性，掌握集成霍尔传感器的使用方法。

【实验仪器】

新型焦利秤、集成开关型霍尔传感器、砝码等。

【实验原理】

1. 弹簧的劲度系数  $k$  的测量（静态法和动态法）

（1）静态法。弹簧在外力作用下将产生形变，在弹性限度内，外力和它的形变量成正比，即

$$F = k\Delta y \tag{10-1}$$

这就是胡克定律。式中， $k$  为弹簧的劲度系数，它与弹簧的形状、材料有关。通过测量  $F$  和相应的  $\Delta y$  的对应关系，就可由式（10-1）推算出弹簧的劲度系数  $k$ 。

（2）动态法。将质量为  $M$  的物体垂直悬挂于支架上弹簧的自由端，构成一个弹簧振子，若物体在外力作用下离开平衡位置少许，然后释放，则物体就在平衡位置附近做简谐振动，其周期为



$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M + pM_0}{k}} \quad (10-2)$$

式中,  $p$  是待定系数, 它的值近似为  $1/3$ ;  $M_0$  是弹簧本身的质量;  $pM_0$  称为弹簧的有效质量。通过测量弹簧振子的振动周期  $T$ , 就可由式 (10-2) 计算出弹簧的劲度系数  $k$ 。

## 2. 弹簧的有效质量测量

由动态法测得的周期可写成

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k}m + \frac{4\pi^2}{k}pm_0 \quad (10-3)$$

式 (10-3) 说明:  $T$  仅取决于振子本身的特性, 与初始条件无关; 当  $k$  一定时,  $T^2$  正比于  $m$ , 即  $T^2$ - $m$  图为一一直线, 其斜率为  $b = \frac{4\pi^2}{k}$ , 截距为  $c = \frac{4\pi^2}{k}pm_0$ 。由斜率和截距即可求出弹簧的有效质量  $pm_0 = \frac{c}{b}$ 。

## 【仪器介绍】

集成开关型霍尔传感器介绍如下。

如图 10-1 所示, 集成霍尔开关是由稳压器 A、霍尔电势发生器 (硅霍尔片) B、差分放大器 C、施密特触发器 D 和 OC 门输出 E 这 5 个基本部分组成的。(1)、(2)、(3) 代表集成霍尔开关的三个引出端点。

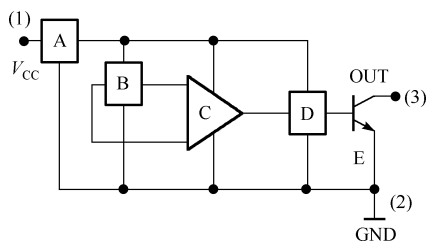


图 10-1 集成开关型霍尔传感器原理图

在输入端 (1) 输入电压  $V_{CC}$ , 经稳压器稳压后加在霍尔电势发生器的两端。根据霍尔效应原理, 当硅霍尔片处于磁场中时, 在垂直于磁场的方向通以电流, 则与这二者相垂直的方向上将会产生一个霍尔电势差  $V_H$  输出, 该  $V_H$  信号经放大器放大以后送至施密特触发器整形, 使触发器整形, 使其成为方波输送到 OC 门输出。当施加的磁场达到“工作点” ( $B_{op}$ ) 时, 触发器输出高电压 (相对于地电位), 使三极管导通, 此时, OC 门输出端输出低电压, 通常称这种状态为“开”。当施加的磁场达到“释放点” ( $B_{rp}$ ) 时, 触发器输出低电压, 三极管截止, 使 OC 门输出高电压, 这时称其为“关”态, 这样两次高电压变换, 使霍尔开关完成了一次开关动作。

$B_{op}$  与  $B_{rp}$  的差值一定, 此差值  $B_h = B_{op} - B_{rp}$  称为磁滞, 在此差值内,  $\zeta_0$  保持不变, 因而使开关输出稳定可靠, 这也就是集成开关型霍尔传感器的优良特性之一。

集成开关型霍尔传感器输出特性如图 10-2 所示。

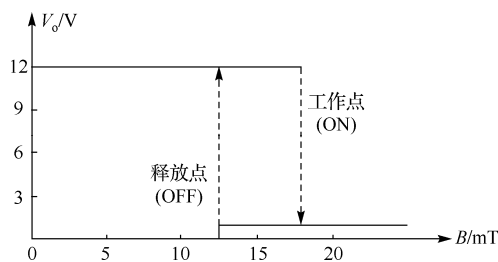


图 10-2 集成开关型霍尔传感器输出特性

## 【实验内容与步骤】

### （1）调节仪器

① 将仪器按照如图 10-3 所示安装：将弹簧固定在焦利秤上部的横梁上，在一个刻有水平线的小平面镜杆下端挂上砝码盘，小平面镜杆穿过固定在立柱上的玻璃管，其上端与弹簧的下端相连。

② 调节焦利秤的底脚螺旋，使焦利秤立柱竖直；调节螺旋 E，使小平面镜上水平线与玻璃管壁上的水平线重合作为平衡位置，并调节支架让小镜面及其他参与振动的物体竖直。

### （2）测量弹簧的劲度系数 $k$

#### ① 利用新型焦利秤（静态法）测定弹簧劲度系数 $k$

（a）调节实验装置底脚螺丝，使焦利秤立柱垂直（目测）。

（b）将弹簧固定在焦利秤上部悬臂上，旋转悬臂，使挂于弹簧下放的砝码盘的尖针靠拢游标尺上的小镜。

（c）在砝码盘中依次放入 0、1、2、3、4 这 5 个砝码，在三线重合（小钩中的平面镜中有一水平刻线 G，玻璃管上有一水平刻线 D，D 在平面镜中有一像 D'，通过转动标尺调节旋钮可将弹簧上下移动，则平面镜同时上下移动。当 G、D、D' 三者重合时称“三线重合”）时，记录各次标尺读数  $y_1, y_2, \dots, y_6$ 。

（d）作  $m_i - y_i$  图，验证  $m_i - y_i$  满足线性关系，并求出斜率  $K'$ ， $K'/g$  即为弹簧的劲度系数  $k$ 。

#### ② 测量弹簧振子振动周期求弹簧劲度系数 $k$ （动态法）

（a）用电子秒表测弹簧振子振动 50 次的时间，然后求得弹簧振子的周期  $T$ 。

（b）用集成开关型霍尔传感器测量弹簧振动周期，求弹簧劲度系数。

将集成霍尔开关的三个引脚分别与电源和周期测试仪相接。OUT 接周期测试仪正级， $V^-$  接电源负极，并和周期测试仪负极连接， $V^+$  接电源正极，如图 10-4 所示，将钕铁硼磁钢粘于 20g 砝码下端，使 S 极面向下。把集成霍尔开关感应面对准 S 极，其与磁钢间距在 10~20cm 范围内。轻轻拉动弹簧使其上下振动，记录振动 50 次的时间，求出弹簧振子周期。要求进行多次测量（测量 5~6 次，每次 50 个周期）。



图 10-3 仪器安装图

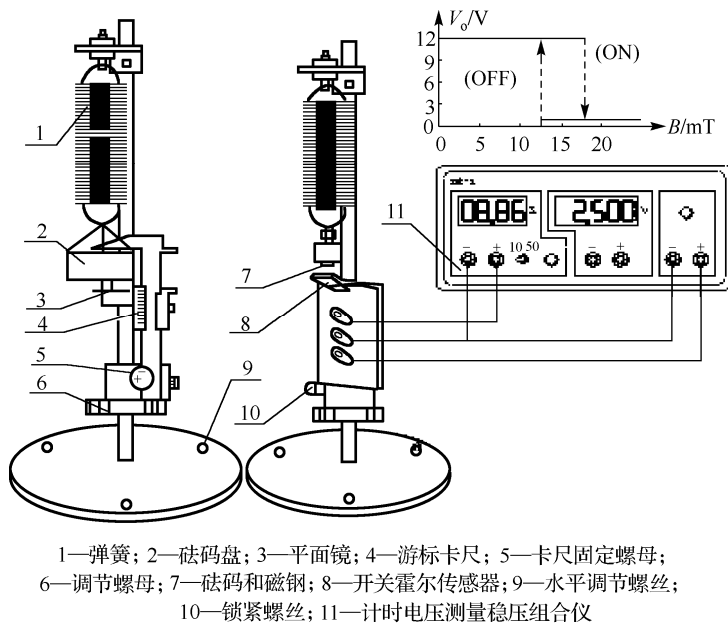


图 10-4 集成霍尔传感器特性与简谐振动实验仪结构图

## ③ 测量集成开关霍尔传感器的参数（选做）

如图 10-5 所示接线，把小块钕铁硼磁钢粘在固定支架上，使小磁钢的 S 极与集成开关型霍尔传感器（简称集成霍尔开关）的感应面（有文字面）紧密相对（接触），记录电路板在固定支架上的位置  $x_0$ ，将集成霍尔开关向外线移动。当发光二极管熄灭时，记录电路板的位置  $x_1$ ，再将集成霍尔开关向内线移动，当发光二极管又被点亮时，再记录电路板的位置  $x_2$ ，计算该传感器与磁钢间距的关系（相距  $|x_2 - x_0|$  时工作，相距  $|x_1 - x_0|$  时释放）。然后，用 95A 型集成线性霍尔传感器测量离磁钢距  $d$  处的磁感应强度  $B$ 。求出集成霍尔开关的特性参数：工作点  $B_{op}$  及工作距离  $D_{op} = |x_2 - x_0|$ ，释放点  $B_p$  及释放距离  $d_p = |x_1 - x_0|$ ，计算磁滞值

$$B = \frac{U - 2.500}{K} (\text{mT}) \quad (10-4)$$

$$B = \frac{U'}{K} (\text{mT}) \quad (10-5)$$

式中， $K$  为传感器灵敏度，95A 型基层霍尔元件见附录。

95A 型集成线性霍尔传感器的连接方法和集成开关型霍尔传感器的基本相同，不同的只是不接周期测试仪，而是接电压表。先将 95A 型集成线性霍尔传感器远离磁场，调节输入电压，使输出霍尔电压为 2.500V，再进行测量，此时运用式 (10-4)，如果补偿了零磁场时的 2.500V，运用式 (10-5)。

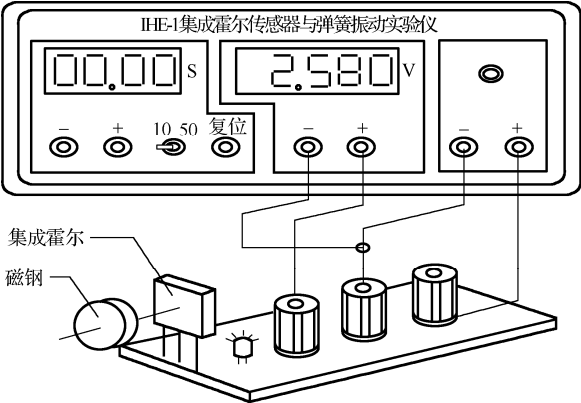


图 10-5 测量集成开关型霍尔传感器的参数连线图

【实验数据记录与处理】

1. 原始数据

表 10-1 静态测量时砝码质量与标尺度数

$m/\text{g}$	2 增	2 减	4 增	4 减	6 增	6 减	8 增	8 减	10 增	10 减
$y/\text{cm}$										

表 10-2 利用秒表和集成开关型霍尔传感器分别测量弹簧振动周期

$m/\text{g}$	2			4			6			8			10		
秒表测量周期（如无秒表就不测此项）															
50 <i>T</i> /s	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$\overline{50T}/\text{s}$															
$T/\text{s}$															
$T^2/\text{s}^2$															
集成开关型霍尔传感器测量周期															
动态法 $y/\text{cm}$															
50 <i>T</i> /s	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$\overline{50T}/\text{s}$															
$T/\text{s}$															
$T^2/\text{s}^2$															

表 10-3 测量集成开关霍尔传感器的参数

测量次数	1	2	3	4	5
位置 $x_1$					
位置 $x_2$					

## 2. 数据处理

(1) 由表 10-1 数据作  $m_i$ - $y_i$  图线, 求出斜率  $a$ , 即劲度系数  $k_1 = ga$ 。

(2) 验证弹簧振子的周期  $T$  与初始条件无关;  $k$  一定时,  $T^2$  与  $m$  成正比。

由表 10-2 数据作出  $T^2$ - $m$  图线。当  $k$  一定时,  $T^2$  正比于  $m$ , 即  $T^2$ - $m$  图为一一直线, 其斜率为  $b = \frac{4\pi^2}{k}$ , 截距为  $c = \frac{4\pi^2}{k} pm_0$ 。由斜率和截距即可求出弹簧的有效质量  $pm_0 = \frac{c}{b}$ , 劲度

系数  $k_2 = 4b\pi^2$ 。比较两种方法测量的劲度系数的相对误差,  $B = \frac{|k_1 - k_2|}{k_1} \times 100\%$ 。

(选做)(3) 计算开关型霍尔传感器的工作距离  $D_{op}$ 、释放距离  $d_{rp}$  及磁滞值。

## 【思考题】

1. 实验中除了可由  $m_i$ - $y_i$  图线判断弹簧的弹性回复力与弹簧偏离平衡位置的位移呈线性关系外, 还可以由什么来判断这一关系?
2. 集成霍尔开关有哪些主要特性参数? 怎样测量这些特性参数?
3. 集成霍尔开关测量周期或转速有何优点? 是否可以举些例子, 说明集成霍尔开关的应用?

## 【附录】

### 1. A44E 集成霍尔开关

实验中用于测量的 A44E 集成霍尔开关, 磁钢用直径  $D = 6.004\text{mm}$ , 长度为  $L = 3.032\text{mm}$  的钕铁硼磁钢。电源用直流, 霍尔开关输出由 4 位半直流数字电压表测量, 磁感应强度  $B$  用 95A 型集成霍尔元件测量。

图 10-6 中, 图 10-6(a) 为集成霍尔传感器外形图。测量时 (1) 和 (2) 两端加直流 +12V, 在输出端 (3) 与电流 (1) 之间接一个  $2\text{k}\Omega$  的负载电阻, 如图 10-6(b) 所示。

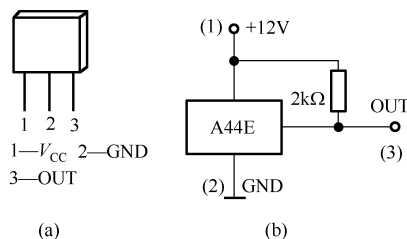


图 10-6 集成霍尔传感器

(1) 输出特性传感器的主要特性是输出特性, 即输入磁感应强度  $B$  与输出电压  $V_o$  之间的关系。测量所得数据如表 10-4 所示。

表 10-4 实验数据表

工作电压  $V_{CC} = 12\text{V}$

参数名称	符号	测量数据			单位
		最小	典型	最大	
“工作点”	$B_{op}$	15.2	16.9	18.5	mT
“释放点”	$B_{rp}$	11.7	13.2	13.5	mT
磁滞	$B_H$	3.5	3.7	5.0	mT

从表 10-4 中数据可见，A44E 集成霍尔开关是单稳态型。由测量数据作出的特性曲线如图 10-2 所示。

(2) 磁输入特性

传感器的磁输入基本有三种情况：单极磁场、双极磁场和交变磁场。A44E 集成霍尔开关的磁输入为单极磁场，即施加磁场的方式是改变磁铁和集成霍尔开关之间的距离。

测量时，将磁铁固定，移动集成霍尔开关，且使移动方向在磁铁与霍尔开关的轴心线方向上。实验中显示，当磁铁和霍尔开关移近到一定位置时，霍尔开关接通，二者移开一定距离后，霍尔开关断开。若以两者之间的距离为  $r$ ，则测得  $r = 4\text{mm}$  时，霍尔开关导通，此时  $B = 16.9\text{mT}$ ，而  $r = 5\text{mm}$  时，霍尔开关断开，测得  $B = 13.2\text{mT}$ 。可见导通点与释放点间距离值为  $1\text{mm}$ ，这是用直径只有  $D = 4.0\text{mm}$  钕铁硼强磁材料做成磁铁测量的结果，其他形状和大小磁铁的测量结果略有不同。

2. 95A 型集成霍尔元件

95A 型集成霍尔元件的内部结构如图 10-7 所示。左端为一霍尔传感器，中间连接了一个放大器，右端方框表示薄膜电阻组成的剩余电压补偿器。95A 型集成霍尔元件测量时输出信号大，不必考虑剩余电压的影响， $V_+$  与  $V_-$  的电压差为  $5\text{V}$  左右， $0$  和  $V_-$  两端即为输出电压。在磁感应强度为零时，调节电流电压，使输出电压为  $2.500\text{V}$ ，在此标准状态下，它的输出电压  $U$  与磁感应强度  $B$  的关系如图 10-8 所示，可表示为

$$B = \frac{U - 2.500}{K} (\text{mT})$$

式中， $U$  为集成霍尔传感器的输出电压， $K$  为该集成霍尔传感器的灵敏度。

如果外接一个  $2.500\text{V}$  辅助直流电源，使磁感应强度为  $0$  时，输出信号  $U_1$  为  $0$ ，那么集成霍尔传感器输出电压  $U_1$  与磁感应强度  $B$  的关系为

$$B = \frac{U'}{K} (\text{mT})$$

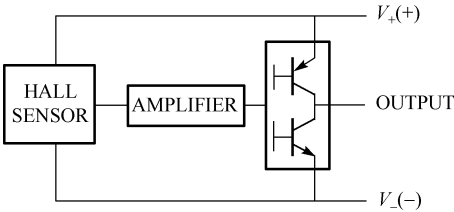


图 10-7 95A 型集成霍尔元件的内部结构

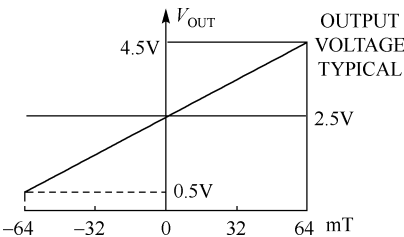


图 10-8 95A 型集成霍尔传感器的特性曲线

表 10-5 95A 集成霍尔线性传感器参数

供电电压 (VDC/V)		4.5~10.5
供电电流@25℃/mA	Typ	7.0

续表

	Max	8.7
输出类型		比率变化
输出电流/mA		
典型电流源	$V_s > 4.5V$	1.5
最小电流源	$V_s > 4.5V$	1.0
最小电流沉	$V_s > 4.5V$	0.6
最小电流沉	$V_s > 5.0V$	1.0
磁场范围	Typ	Gauss: $-670 \sim +670$ ( $-67 \sim +67$ mT)
	Min	Gauss: $-600 \sim +600$ ( $-60 \sim +60$ mT)
输出电压范围	Typ	$0.2 \sim (V_s - 0.2)$
	Min	$0.4 \sim (V_s - 0.4)$
零点电压/V		$2.500 \pm 0.075$
灵敏度/(mV/G)		$3.125 \pm 0.125$
线性误差/(%量程)	Typ	-1.0%
	Min	-1.5%
零点漂移/(%/°C)		$\pm 0.06\%$
灵敏度漂移/(%/°C)	$> 25^\circ\text{C}$ Max	$+0.02\% \pm 0.03\%$
	$< 25^\circ\text{C}$ Max	$+0.03\% \pm 0.03\%$

## 实验十一 用单摆测重力加速度

### 【实验目的】

1. 掌握用单摆法测量重力加速度的方法，加深对简谐运动规律的认识。
2. 学习数显周期时间记录仪的使用。
3. 学习用图解法处理数据。

### 【实验仪器】

单摆，数显周期时间记录仪，钢米尺。

### 【实验原理】

一根不能伸缩的细线，上端固定，下端悬挂一个金属小球，当细线质量比小球质量小很多，而且球的直径又比细线的长度小很多时，就可以把小球视为一个不计细线质量的质点。如果把悬挂的小球（摆球）自平衡位置拉至一边（保持摆角  $\theta < 5^\circ$ ），然后释放，摆球即在平衡位置左右做周期性摆动，这种装置称为单摆，如图 11-1 所示。

摆球所受的力  $f$  是重力  $P$  和绳子张力的合力，指向平衡位置。当

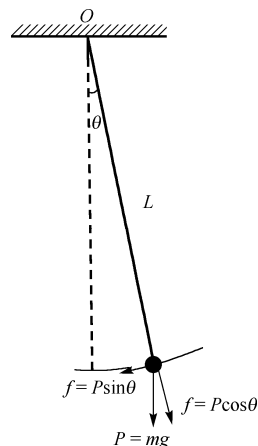


图 11-1 单摆的受力分析图

摆角很小时 ( $\theta < 5^\circ$ )，圆弧可以近似视为直线，合力  $f$  也可以近似视为沿着这一直线。设小球的质量为  $m$ ，其质心到摆的支点的距离为  $L$ （摆长），小球位移为  $x$ ，则

$$\sin \theta \approx \frac{x}{L} \quad (11-1)$$

$$f = P \sin \theta = -mg \frac{x}{L} = -m \frac{g}{L} x$$

由  $f = ma$

$$\text{可得} \quad a = -\frac{g}{L} x \quad (11-2)$$

由式 (11-2) 可知，单摆在摆角很小时，质点的运动可以近似视为简谐振动。简谐振动的动力学方程可归结为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$$

$$\text{即} \quad a = -\omega^2 x \quad (11-3)$$

比较式 (11-2) 和式 (11-3)，可得单摆简谐振动的圆频率为

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

于是单摆的运动周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

两边平方

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g}$$

即

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2} \quad (11-4)$$

若测得  $L$ 、 $T$ ，代入式 (11-4) 即可求得当地的重力加速度  $g$ 。若测出不同摆长  $L_i$  下的周期  $T_i$ ，作  $T_i^2$ - $L_i$  图线，由直线的斜率可求出当地的重力加速度  $g$ 。

实验时，测量一个周期的相对误差较大，一般是测量连续摆动  $n$  个周期的时间  $t$ ，则  $T = t/n$ ，因此

$$g = 4\pi^2 \frac{n^2 L}{t^2} \quad (11-5)$$

## 【实验内容与步骤】

1. 测量摆长  $L$ 。用钢米尺测量摆长，摆长  $L$  应是摆线长度加小球的半径。
2. 测量单摆摆动周期  $T$ 。拉开摆球，然后放手，使单摆在竖直平面内做小角度（摆角  $\theta < 5^\circ$ ）



摆动,用计时器测出单摆摆动  $n = 20$  个周期所需要的时间  $t$  ( $20T$ ),重复测量 5 次,将数据记入表 11-1 中。

3. 按式 (11-5) 计算  $g$  值,求不确定度,按标准形式写出测量结果。

4. 取摆长分别约等于 100cm、90cm、80cm、70cm、60cm,测出与各摆长对应的 20 个周期的时间 ( $20T$ ),将数据记入表中。

5. 用 Excel 图解法处理数据。以  $L$  为横坐标,以  $T^2$  为纵坐标,拟合直线,求出直线的斜率,并由此求出  $g$ 。

### 【实验数据记录与处理】

表 11-1 单摆实验数据表

项目 摆长/cm	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$	$t_5/s$	$\bar{t} / s$	$\bar{T} / s$	$\bar{T}^2 / s^2$
100.00								
90.00								
80.00								
70.00								
60.00								

1. 公式法求解重力加速度及其不确定度。

2. 图解法处理数据:作  $T^2-L$  图线 ( $T^2 = \frac{4\pi^2}{g}L$ , 理论上应为一 条直线), 求出其斜率  $k$ ,

由  $k = \frac{4\pi^2}{g}$  便可求出  $g$  值。

### 【思考题】

公式  $g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}$  成立的条件是什么? 在实验中如何保证这一条的实现?

## 实验十二 信号的傅里叶分析

### 【实验目的】

1. 了解常用周期信号的傅里叶级数表示。
2. 了解周期脉搏信号、语音信号及图像信号的傅里叶分析过程。
3. 理解、体会傅里叶分析的理论及现实意义。

## 【仪器和用具】

脉搏语音实验仪器，数字信号发生器，示波器。

## 【实验原理】

任意一个周期为  $T$  的函数  $f(t)$  都可以表示为傅里叶级数

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega_0 t) d(\omega_0 t)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega_0 t) \cos(n\omega_0 t) d(\omega_0 t)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega_0 t) \sin(n\omega_0 t) d(\omega_0 t)$$

式中， $\omega_0$  为角频率，称为基频； $a_0$  为常数； $a_n$  和  $b_n$  称为第  $n$  次谐波的幅值。任何周期性非简谐交变信号均可用上述傅里叶级数进行展开，即分解为一系列不同次谐波的叠加。

对于如图 12-1 所示的方波，一个周期内的函数表达式为

$$f(t) = \begin{cases} h & \left(0 \leq t < \frac{\pi}{2}\right) \\ -h & \left(-\frac{\pi}{2} \leq t < 0\right) \end{cases}$$

其傅里叶级数展开为

$$f(t) = \frac{4h}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{2n-1} \right) \sin(2n-1)\omega_0 t$$

$$= \frac{4h}{\pi} \left( \sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \cdots \right)$$

同理，对于如图 12-2 所示的三角波，函数表达式为

$$f(t) = \begin{cases} \frac{4h}{T} t & \left(-\frac{T}{4} \leq t < \frac{\pi}{4}\right) \\ 2h \left(1 - \frac{2t}{T}\right) & \left(\frac{T}{4} \leq t < \frac{3T}{4}\right) \end{cases}$$

其傅里叶级数展开为

$$\begin{aligned}
 f(t) &= \frac{8h}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \left( \frac{1}{2n-1} \right)^2 \sin(2n-1)\omega_0 t \\
 &= \frac{8h}{\pi^2} \left( \sin \omega_0 t - \frac{1}{3^2} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5^2} \sin 5\omega_0 t + \dots \right)
 \end{aligned}$$

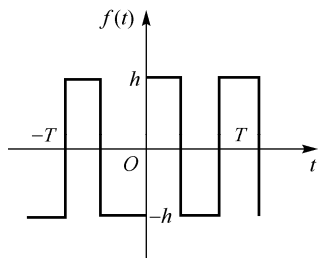


图 12-1 方波

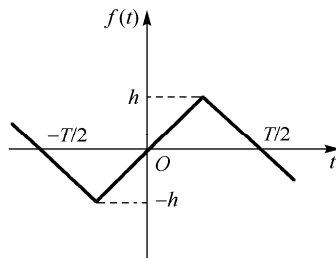


图 12-2 三角波

从以上各式可知,任何周期信号都可以表示为无限多次谐波的叠加,谐波次数越高,振幅越小,它对叠加波的贡献就越小,当小至一定程度时(谐波振幅小于基波振幅的 5%),则高次的谐波就可以忽略而变成有限次数谐波的叠加,这对设计仪器电路是很有意义的。

## 【实验内容与步骤】

### 1. 傅里叶级数的合成

(1) 利用数字信号发生器产生频率分别为 100Hz、300Hz、500Hz 的正弦信号,并使其相位相同,振幅比为 1:1/3:1/5,将上述三个信号分别通过加法器输入到傅里叶分析仪,观察并记录其波形。

(2) 利用数字信号发生器产生方波,输入到傅里叶分析仪,并将其与上述合成后的信号相比较。两者有何差异?试分析引起的原因,应如何消除?

(3) 利用数字信号发生器产生频率分别为 200Hz、600Hz、1000Hz 的正弦信号,振幅比为 1:1/3<sup>2</sup>:1/5<sup>2</sup>,并且保证其相位相差 180°,然后通过加法器输入到傅里叶分析仪,观察并记录其波形,并与数字信号发生器产生的三角波相比较。

(4) 利用傅里叶分析仪分别产生方波与三角波,进行傅里叶分析,记录各正弦波频率以及相对的幅度之间的关系,并与上述加法器输入信号相比较。

### 2. 滤波与选频分析

对上述(4)傅里叶分析的频谱,分别选择低频段和高频段信号通过傅里叶反变换,观察它们的图像并导出保存,试分析低通滤波和高通滤波图像的区别。

### 3. 周期信号傅里叶分析的应用

(1) “脉搏信号”的傅里叶分析

① 用傅里叶分析仪软件中提供的“脉搏信号”模块和压电晶体测试自己脉搏波的信号，观察你的脉搏信号。

② 选择完整的周期信号进行频谱分析，并选择合适的频段，测量其中心频率。

③ 深呼吸后，重复上述实验，请比较两次中心频率的变化。

(2) 图像信号的傅里叶分析

① 用傅里叶分析仪软件提供的“图片分析”模块，分别选择图片“双缝干涉”、“彩色十字”、“光字”及“箭头”进行空域的傅里叶频谱分析。

② 分别选择低通和高通滤波器进行滤波，记录所用滤波器的参数，并将滤波后的图片导出保存。

③ 将滤波后的图像与原图像对比，可得何结论？

(3) 语音信号的傅里叶分析与识别

① 用傅里叶分析仪软件提供的“语音信号”模块，通过外置麦克风采集语音信号，并选择合适的频段，记录该频段语音信号的傅里叶分析频谱。

② 利用“选择频谱”功能，滤除噪声频率后，进行频率合成；将合成后的结果与①中采集的原语音信号对比，为语音识别打下基础。

③ 利用软件提供的“语音识别”模块，通过麦克风采集两次相同或不同元音的信号，重复上述过程，分别记录两次频谱的分布，并利用“语音识别”模块体验语音识别功能。

④ 利用软件中提供的“长时语音”模块，通过外置麦克风采集一段语音信号，并观察傅里叶分析频谱实时频谱变化。

## 实验十三 耦合摆的研究

### 【实验目的】

1. 测定单摆的固有频率和耦合摆的简正频率。
2. 观察不同的耦合长度对振动系统的影响和规律，从中观察“拍”的现象。
3. 验证耦合长度的平方分别与支频率的平方和反相振动简正频率的平方呈线性关系。
4. 学会作图法处理数据。

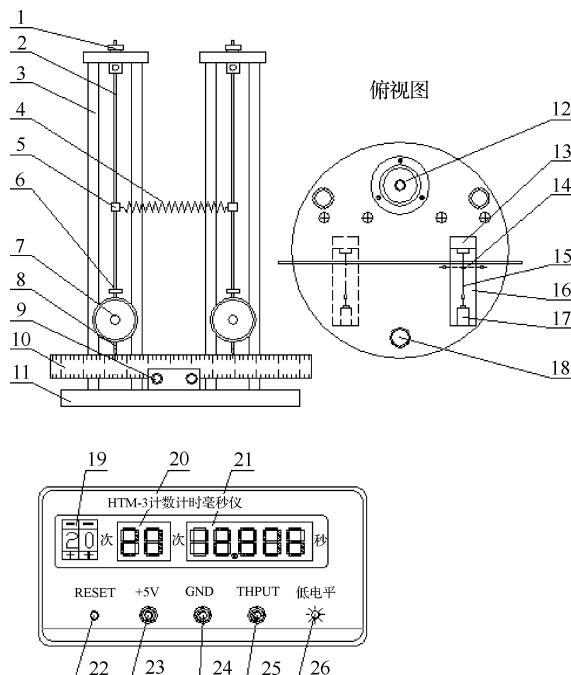
### 【仪器和用具】

耦合摆实验装置 计数计时多用秒表 组成激光光电门（计数计时传感器）。

### 【实验原理】

设一单摆，摆长为  $L$ ，则固有圆频率  $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}}$ ，式中  $g$  为重力加速度。将两个完全相同的单摆通过一根弹簧耦合组成耦合摆，如果一个摆固定，另一个摆振动的频率称为支频率，支

频率  $\omega = \sqrt{\frac{g}{L} + \frac{K}{m}}$ ，式中  $K$  为弹簧的倔强系数， $m$  为单摆有效质量。耦合摆实验装置如图 13-1 所示。通过调整使固有圆频率相等后组成的耦合摆，其两个支频率相等， $\omega_1 = \omega_2$ 。



1—摆杆固定和调整螺母；2—摆杆；3—立柱；4—耦合弹簧；5—耦合位置调节环；6—振动频率微调螺母；7—摆锤；8—振幅指针兼计数计时挡杆；9—水平尺固定架；10—振幅测量直尺；11—底盘；12—气泡式水准仪；13—仪器水平调整旋钮；14—激光发射部件和信号处理部件；15—可见红色激光束；16—挡光片；17—激光接收探头；18—激光光电门支架；19—次数预置；20—次数显示；21—相应次数的计时显示窗；22—计数计时复位按钮；23—+5V 接线柱；24—GND（公共地）接线柱；25—计数计时信号输入接线柱；26—输入信号低电平指示

图 13-1 耦合摆实验装置示意图

实际上耦合系统的振动方式比较复杂，取决于初始条件。存在两种特有的振动方式：一种是两摆往相同方向从平衡位置移开相等距离引起的振动，即同相振动；另一种是两摆从平衡位置往相反方向移开相等距离引起的振动，即反相振动。反相振动和同相振动称为简正振动，其频率称为简正频率。反相振动时，其简正频率为  $\omega_{\text{反}} = \sqrt{\frac{g}{L} + \frac{K}{m}}$ ；同相振动时，其简正频率为  $\omega_{\text{同}} = \sqrt{\frac{g}{L}}$ （同固有频率）。

在一般情况下，耦合系统的振动是这两种简正振动的组合，振动表现出拍振的性质，拍振频率  $\omega = \omega_{\text{反}} - \omega_{\text{同}}$ ，两个摆相继地发生振幅周期性增大和减小，能量在两个摆之间来回交替传递。

【实验内容及数据记录】

测定单个摆的固有振动频率，调整使两摆的振动频率（或周期）相同。

测单个摆的固有圆频率， $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}}$ 。不加耦合弹簧，用激光光电门结合计数计时毫秒仪，测出 10 个周期的时间，计算出振动频率。调整微调螺母，使两摆在同样起始振幅下的振动周期相同。其误差小于 1%。

实验时计时周期数为 10，所以计数计时多用秒表预置次数设置为 20，振幅指针经过平衡位置 20 次，用手在水平方向移开摆锤，使振幅指针偏离平衡位置 25mm 后放开。实验测量周期记为  $T_0$ ，振动频率记为  $f_0$ ，将实验数据记入表 13-1。

表 13-1 实验数据记录表

序 号	单摆 1			单摆 2		
	$10T_0/\text{s}$	$T_0/\text{s}$	$f_0/(1/\text{s})$	$10T_0/\text{s}$	$T_0/\text{s}$	$f_0/(1/\text{s})$
1						
2						
3						
4						
5						
平均值						

在不同摆杆位置用弹簧耦合连接，测定耦合系统的支频率。测定耦合摆的两个简正频率；验证耦合长度的平方与其反相振动频率的平方呈线性关系。

(1) 测定耦合系统的支频率  $\omega_1 = \omega_2 = \sqrt{\frac{g}{L} + \frac{K}{m}}$ 。将两摆用弹簧连接起来，用手固定单摆 1（左面单摆），使单摆 2（右面单摆）振动，用激光光电门结合计数计时毫秒仪，测出 10 个周期的时间，计算出振动频率。实验时计时周期数为 10，所以计数计时多用秒表预置次数设置为 20，振幅指针经过平衡位置 20 次，用手在水平方向移开摆锤，使振幅指针偏离平衡位置 25mm 后放开。在耦合长度分别为 20cm、25cm、30cm、35cm、40cm 时，实验测量支频率记为  $f_1$  和  $f_2$ 。耦合长度是指耦合点到摆杆转动轴心的距离，记为  $L$ ，将实验数据记入表 13-2。

表 13-2 实验数据记录表

耦合长度 $L/\text{cm}$	$10T/\text{s}$	$T/\text{s}$	$f/(1/\text{s})$
20			
25			
30			
35			
40			

(2) 测定耦合摆的简正频率  $\omega_2 = \sqrt{\frac{g}{L}}$  (与自由振动的单摆固有频率相同)。把两个摆往相

同的方向从平衡位置移开相等距离, 使振幅指针偏离平衡位置 25mm 后放开, 用激光光电门结合计数计时多用秒表, 测出 10 个周期振动时间, 计算振动频率。实验时计时周期数为 10, 计数计时预置次数设置为 20, 振幅指针经过平衡位置 20 次, 在耦合长度分别为 20cm、25cm、30cm、35cm、40cm 时, 实验测量简正频率, 记为  $f_2$ , 将实验数据记入表 13-3。

表 13-3 实验数据记录表

耦合长度 $L/\text{cm}$	$10T_2/\text{s}$	$T_2/\text{s}$	$f_2/(1/\text{s})$
20			
25			
30			
35			
40			

(3) 测定耦合摆的简正频率  $\omega_1 = \sqrt{\frac{g}{L} + \frac{2K}{m}}$ 。把两个摆从平衡位置对称地往相反方向拉开,

即做反相振动, 在两摆振幅指针偏离平衡位置 25mm 后放开, 用激光光电门结合计数计时多用秒表, 测出 10 个周期的时间, 计算出振动频率。实验时计时周期数为 10, 计数计时多用秒表预置次数设置为 20, 振幅指针经过平衡位置 20 次, 在耦合长度分别为 20cm、25cm、30cm、35cm、40cm 时, 实验测量简正频率, 记为  $f_1$ , 将实验数据记入表 13-4。

表 13-4 实验数据记录表

耦合长度 $L/\text{cm}$	$10T_1/\text{s}$	$T_1/\text{s}$	$f_1/(1/\text{s})$
20			
25			
30			
35			
40			

由上述数据作  $f_1^2-L^2$  图, 说明反相振动频率的平方与耦合长度的平方其呈线性关系。

用弹簧耦合, 测定在不同耦合长度时, 耦合长度的平方与拍频呈线性关系。

观察拍振, 测出拍振频率, 握住左摆不动, 拉开右摆 20mm, 然后同时释放两摆, 观察两摆的振动情况, 可以看到左摆位相总是落后于右摆。振动的能量从右边的摆逐渐转移到左边的摆, 然后又从左边的摆逐渐返还到右边的摆, 此时相位亦产生变换, 右摆的相位又落后于左边的摆。如此周期性地, 可以明显地看到每个摆的振动都具有拍的特征。

用计数计时多用秒表测出拍振周期, 即测出一个摆相邻两次摆动中止的时间间隔, 从而算出拍振频率。实验证明  $f = f_1 - f_2$ , 实验时, 用左手固定单摆 1 摆锤 (左摆), 右手沿水平方向移开单摆 2 摆锤 (右摆), 使振幅指针偏离平衡位置 25mm 后两手松开。在耦合长度分别为 20cm、25cm、30cm、35cm、40cm 时, 实验测量拍振周期  $T_{\text{拍}}$ , 将实验数据记入表 13-5。

表 13-5 实验数据记录表

耦合长度 $L/\text{cm}$	$T_{\text{拍}}/\text{s}$	$f_{\text{拍}}/(1/\text{s})$
20		
25		
30		
35		
40		

由上述数据作  $f_{\text{拍}}-L^2$  图，说明拍频与耦合长度的平方呈线性关系。

### 【注意事项】

1. 激光光电门由激光发射和接收两部分组成。激光发射部分发出红色可见激光，其红线接仪器+5V 接线柱，黑线接 GND 接线柱。接收部件的黑色圆柱小孔为激光接收孔，当其被激光照射后，上面的发光二极管熄灭，黄（信号）线输出低电平。该部件红线接仪器+5V 接线柱，黑线接 GND 接线柱，黄线接 INPUT 接线柱。

2. 实验测量摆动周期时，先调整激光方向，使激光束射向接收部件的小孔，发光二极管熄灭。待测量摆到平衡位置，摆幅指针恰好遮挡激光束，将该激光光电门放置于上述位置的圆底盘上。这样当摆左右摆动中经过平衡位置时遮挡激光束，接收部件将信号输出至计数计时多用秒表。显然计数+1 为半周期，因难以精确置于平衡点，故实验时以一周期测量为好。一般次数预置成偶数，即整数个周期加以实验研究。

3. 多功能毫秒仪（计数计时多用秒表）的使用，计数计时始点时，计数窗显示 00；计时窗显示 00.000；计数次数和次数预置相同时，仪器停止计数计时，可通过“查阅-”或“查阅+”键记录相应次数从开始点所计的时间。重复计数计时按 RESET，次数预置数不大于 64 次，一旦改变预置数，须按 RESET 键方有效。

4. 数字秒表用于记录拍周期，接上 AC9V 插座后，开启电源，按需启动或复位，由人工计时操控。



# 热学实验部分

## 实验十四 固体比热容的测定（混合法）

### 【实验目的】

1. 掌握基本的量热方法——混合法。
2. 测定金属的比热容。
3. 学习运用软件 Origin 对数据进行修正。

### 【仪器和用具】

量热器，温度计（ $0.00^{\circ}\text{C}\sim 50.00^{\circ}\text{C}$  和  $0.0^{\circ}\text{C}\sim 100.0^{\circ}\text{C}$  各一支）或温度传感器一套，物理天平，加热器，待测金属（铝块或铜块），小量筒，停表，冰块若干。

### 【实验原理】

#### 1. 混合法测比热容

根据热平衡原理，温度不同的物体混合后，热量将由高温物体传给低温物体，如果是绝热的条件下，混合过程中与外界无热量交换，最后达到均匀稳定的热平衡状态。根据能量守恒定律，高温物体放出的热量就应等于低温物体吸收的热量。

将一个温度为  $T_1$  的系统 I 和温度为  $T_2$  的系统 II 混合。混合后的平衡温度为  $T_3$ ，如果不考虑与外界的热交换，则低温系统（设为 II）吸收的热量等于高温系统（设为 I）放出的热量，即

$$c_1(T_1 - T_3) = c_{II}(T_3 - T_2) \quad (14-1)$$

此为热平衡原理。其中  $c_I$ 、 $c_{II}$  为系统 I 和 II 的比热容（单位质量物体改变单位温度时吸收或释放的内能），本实验根据热平衡原理用混合法测定固体的比热容，将高温的金属投入盛室温水的量热器内混合。

将质量为  $m_1$ 、温度为  $t_1$  的金属块投入量热器的水中。设量热器（包括搅拌器和温度计插入水中部分）的热容为  $q$ ，其中水的质量为  $m_0$ ，比热容为  $c_0$ ，待测物投入水中之前的水温为  $t_0$ ，在待测物投入水中后其混合温度为  $t$ ，在不计量热器与外界的热交换的情况下，将存在以下关系

$$m_1 c(t_1 - t) = (m_0 c_0 + q)(t - t_0)$$

即

$$c = \frac{(m_0 c_0 + q)(t - t_0)}{m_1(t_1 - t)} \quad (14-2)$$

量热器的热容  $q$  可以根据其质量和比热容算出。设量热器内筒和搅拌器由相同的物质制成，其质量为  $m_2$ ，比热容为  $c_2$ ，温度计插入水中部分的体积为  $V$ ，则

$$q = m_2 c_2 + 1.9V \quad (14-3)$$

$1.9V$  ( $\text{J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) 为温度计插入水中部分的热容量， $V$  的单位是  $\text{cm}^3$ 。

## 2. 系统散热的修正

由于混合过程中量热器与环境有热交换，先是吸热后是放热，致使由温度计读出的初温  $t_1$  和混合温度  $t$  与无热交换时的初温和混合温度不同，因此必须对  $t_1$  和  $t$  进行校正。

实验时，从投物前 5min 开始测水温，每 30s 测一次，记下投物的时刻与温度，记达到室温  $t_0$  的时刻，水温达到最高点后继续测五六分钟。用温度  $t$  和时间  $\tau$  作图，如图 14-1 所示。过  $\tau_0$  作一竖直线  $MN$ ，过  $t_0$  作一水平线，二者交于  $O$  点，然后描出投物前的吸热线  $AB$ ，与  $MN$  交于  $B$  点，混合后的放热线  $CD$  与  $MN$  交于  $C$  点。混合过程中的温升线  $EF$ ，分别与  $AB$ 、 $CD$  交于  $E$  和  $F$ ，因水温达到室温时量热器一直在吸热，故混合过程的初温应是与  $B$  点对应的  $\theta_0$ ，此值高于投物时记下的温度。同理，水温高于室温后量热器向环境散热，故混合后的最高温度是  $C$  点对应的温度，此值也高于温度计显示的最高温度。

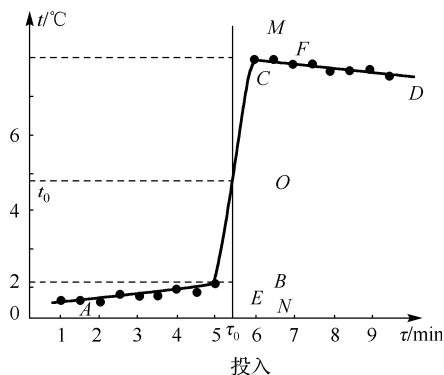


图 14-1 温度和时间关系曲线

## 【实验内容与步骤】

1. 将加热器加入半锅水，开始加热。
2. 用物理天平称被测铜块的质量  $m_1$ ，然后将其吊在加热器中加热。加热器中的温度计要靠近待测物体。
3. 称衡出量热器内筒和搅拌器的总质量  $m_2$ 。

4. 将低于室温的冷水（温度不够低时适当加点冰块降温），倒入量热器内筒（约为其容积的  $2/3$ ），后称衡其质量（包括搅拌器） $m$ ，则冷水的质量为  $m_0 = m - m_2$ 。

开始测水温，并记时间；每隔 30s 测一次，接连测下去。

5. 当加热器（铜块）中温度计指示值稳定不变后，测出其温度  $t_1$ ，就可将被测铜块投放入量热器中。记下物体放入量热器的时间和温度。进行搅拌并观察温度计读数，每 30s 测一次，继续 5min。

6. 应用绘图软件按图 14-1 绘制  $t - \tau$  图，求出混合前的初温  $\theta_0$  和混合温度  $\theta$ 。

7. 将上述各测定值代入式（14-2），求出被测铜块的比热容及其标准不确定度。其中  $18^\circ\text{C}$  时水的比热容  $c_0 = 4177 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，铝的比热容  $c_2 = 880 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，温度计插入水中部分体积  $V$  根据阿基米德原理用小量筒确定。

## 【实验数据记录与处理】

### 1. 数据记录

铜块质量  $m_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  kg；量热器内筒和搅拌器的总质量  $m_2 = \underline{\hspace{2cm}}$  kg；

冰水+量热器内筒+搅拌器总质量  $m = \underline{\hspace{2cm}}$  kg；冷水的质量  $m_0 = \underline{\hspace{2cm}}$  kg。

表 14-1 量热器内温度和时间测量数据记录表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
时间 $\tau/\text{s}$										
温度 $t/^\circ\text{C}$										
测量次数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
时间 $\tau/\text{s}$										
温度 $t/^\circ\text{C}$										

### 2. 数据处理

运用 Origin 软件作图对系统散热进行修正，修正后式（14-2）的  $t_1$  等于图 14-1 中的  $\theta_0$ ，混合后的温度  $t$  即图 14-1 中的  $\theta$ 。

应用式（14-2）计算铜的比热容  $C$  及其标准不确定度。

## 【注意事项】

1. 量热器中温度计位置要适中，不要使它过于靠近放入的高温物体，因为未混合好的局部温度可能高。

2. 冷水的初温不宜比室温低得多。

3. 搅拌时不要过快，以防有水溅出。

4. 尽量缩短投放的时间。

【思考题】

- 1. 混合量热法的原理是什么？它的基本实验条件是什么？如何保证？
- 2. 试分析实验误差的来源，如何减少误差。

Origin 作图步骤如下。

Origin 为 OriginLab 公司出品的较流行的专业函数绘图软件，是公认的简单易学、操作灵活、功能强大的软件，在目前的科技论文写作中，很大一部分数据图都是由 Origin 所做的。接下来简要介绍 Origin 软件在本次实验中数据处理及作图的使用方法（以 Origin8 为例）。

假如实验测得了一组数据，如表 14-2 所示。

表 14-2 实验数据

时间/s	0	1	2	3	4	5	6	6.15"	6.30"
温度/℃	21.44	21.52	21.62	21.70	21.78	21.85	21.90	29.00	30.00
时间/s	6.45"	7	7.30"	8	9	10	11	12	13
温度/℃	30.20	30.20	30.19	30.18	30.15	30.14	30.12	30.11	30.10

打开 Origin 软件，并将测得的数据输入，如图 14-2 所示。

将时间作为  $x$  轴，测得的温度作为  $y$  轴，选中数据，在菜单栏选择 Plot→Symbol→Scatter 做出图像，如图 14-3 所示。

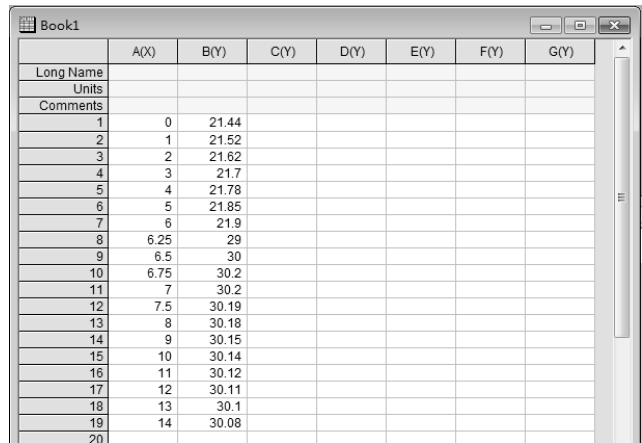


图 14-2 将测得的数据输入

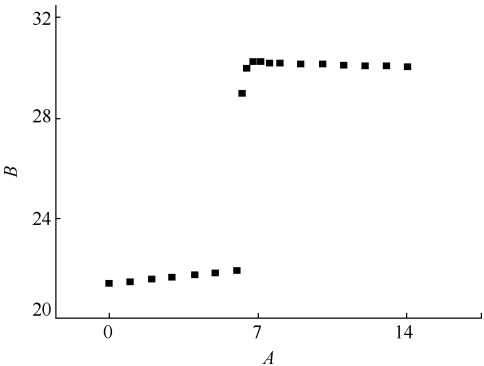


图 14-3 数据图像

接下来对数据进行线性拟合，首先是对低温区前 7 个点做拟合，在菜单栏中选择 Analysis→Fitting Linear Fit→Open Dialog，如图 14-4 所示。

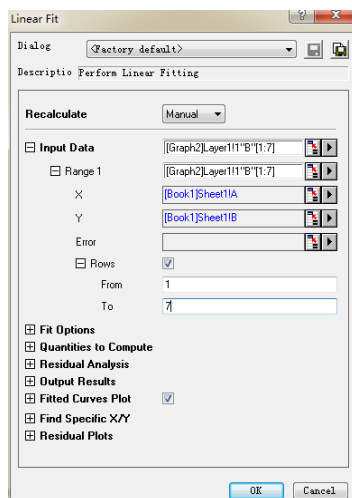


图 14-4 右菜单栏中选择

在弹出的 Linear Fit 对话框中, 单击 Input Data 下的 Range 1, 在 Rows 中选择 By Row。在 From 和 To 中分别输入拟合数据起点与终点的行号 (我们的例子中为 1 和 7), 单击 OK 按钮, 之后会弹出窗口询问是否切换到报告页, 如图 14-5 所示, 根据自己喜好选择即可, 若只想看拟合图, 可以选择 No 选项。

拟合结果如图 14-6 所示。

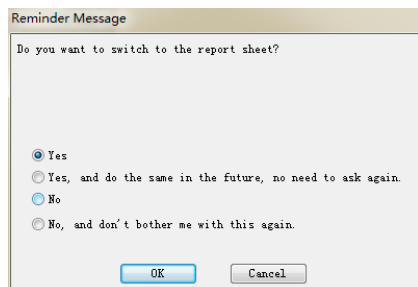


图 14-5 是否切换到报告页

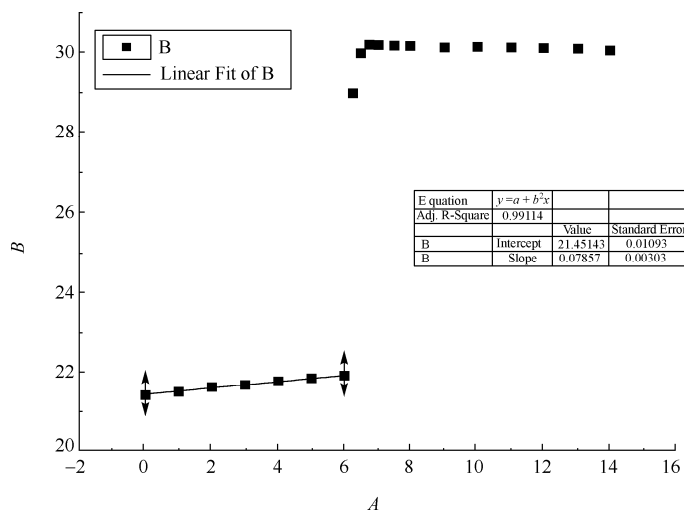


图 14-6 拟合结果

可以看到, 拟合的曲线形式为  $y = a + b \times x$  的形式, 斜率为 0.07857,  $y$  轴上的截距为 21.45143。

类似的, 按照之前的步骤, 我们对高温区的数据进行线性拟合, 选取第 10~19 个数据。拟合结果如图 14-7 所示, 这里把  $x$  轴、 $y$  轴的名字分别由  $A$ 、 $B$  修改成了  $\tau$ 、 $T$ 。

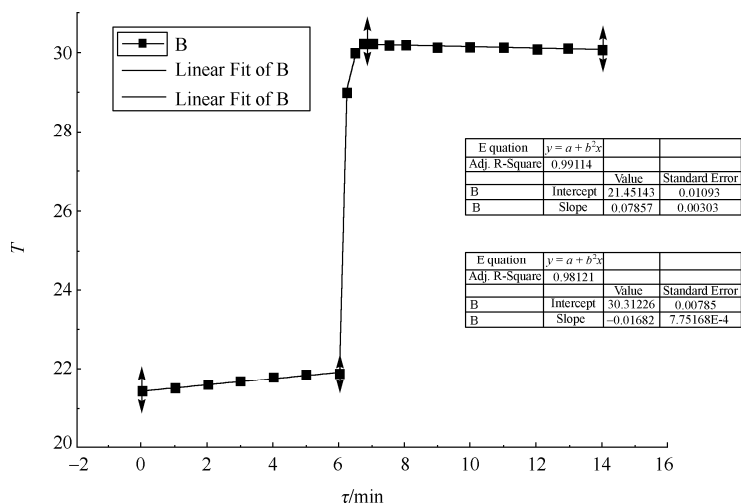


图 14-7 拟合结果

可以看到，对高温区的曲线进行拟合之后，拟合曲线的函数形式为  $y = 30.31226 - 0.01682 \times x$ ，斜率即为  $-0.01682$ ，截距为  $30.31226$ 。以上便是 Origin 处理数据及作图的大致步骤。

## 实验十五 冰溶解热的测量

### 【实验目的】

1. 掌握用混合量热法测量冰的溶解热。
2. 了解应用牛顿冷却定律粗略修正散热。
3. 了解量热实验中减少误差的若干方法。

### 【仪器和用具】

水银温度计两支 ( $0^\circ\text{C} \sim 50.00^\circ\text{C}$  及  $0^\circ\text{C} \sim 100.0^\circ\text{C}$  各一支)，量筒，量热器，物理天平，停表，冰，干拭布，保温瓶，热水等。

### 【实验原理】

#### 1. 混合量热法测冰的溶解热

本实验利用混合量热法来测量冰的溶解热（单位质量的冰在熔点时从固态全部变成液态所需要的热量）。将冰放进装有热水的量热器内充分温合，设本实验涉及的各种物体的质量、温度及相关物理量分别如下。

混合前：

- (1) 冰的质量为  $m_0$ , 温度为  $t_0 = 0$ ;
  - (2) 热水的质量为  $m_1$ , 温度为  $t_1$ , 比热容为  $c_1 = 1.00 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ ;
  - (3) 量热器内筒质量为  $m_2$ , 温度为  $t_1$ , 比热容为  $c_2 = 0.092 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ ;
  - (4) 搅拌器的质量为  $m_3$ , 温度为  $t_1$ , 比热容为  $c_3 = 0.092 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ ;
  - (5) 温度计和热容为  $\delta_m = 0.46V \cdot \text{cal}/^\circ\text{C}$  ( $V$  是温度计浸入水中部分的体积)。
- 混合后: 冰完全熔化时冰水混合系统温度为  $t$ , 以上所列混合前的其他非温度量不变。  
如果实验系统为孤立系统, 根据热平衡方程有

$$Q_{\text{吸}} = Q_{\text{放}} \quad (15-1)$$

$$m_0 L + m_0 c_1 (t - 0) = (m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3 + \delta_m)(t_1 - t) \quad (15-2)$$

$$L = \frac{(m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3 + \delta_m)(t_1 - t) - m_0 c_1 (t - 0)}{m_0} \quad (15-3)$$

## 2. 系统散热修正

热平衡方程是在系统绝热的条件下建立的, 实际的实验过程不可能完全达到绝热的要求, 系统温度与环境温度时时相同是不可能实现的, 因此, 系统与外界交换热量的情况不可避免。当温差较小时 (不超过  $10^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$ ), 散热速度与温度差成正比, 即牛顿冷却定律。其数学表达式为

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} = K(t - \theta) \quad (15-4)$$

式中,  $\frac{\partial q}{\partial \tau}$  为散热速率, 表示单位时间内系统散失的热量;  $K$  为散热常量, 与系统表面积成正比, 并随表面吸收或辐射热的变化而变化;  $t$  为系统的温度;  $\theta$  为环境的温度。

本实验采用牛顿冷却定律粗略修正系统散热。把量热系统和环境分别视为两个物体, 根据热力学第二定律, 热量总是自发地从高温物体传给低温物体。

系统向外界放出或吸收的热量分别为图 15-1 中实线所围的面积  $s_A$  和  $s_B$ , 整个过程中系统与外界交换的热量为

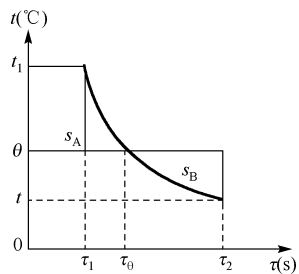


图 15-1 系统温度随时间变化曲线

$$Q = \int_{t_1}^t K(t - \theta) dt = \int_{t_1}^{\theta} K(t - \theta) dt + \int_{\theta}^t K(t - \theta) dt \quad (15-5)$$

第一项  $t - \theta > 0$  ( $t > \theta$ ), 系统向外界放热; 第二项  $t - \theta < 0$  ( $t < \theta$ ), 系统从外界吸收热量。由图 15-1 和式 (15-5) 可知, 只要把水和冰的质量控制好, 就能使图形中的面积  $s_A$  和  $s_B$  相等, 即系统对外界的吸热和放热基本可以相互抵消, 可相当于系统与外界绝热 (孤立系统)。

【实验内容与步骤】

- 1. 用物理天平分别称出量热器内筒和搅拌器的质量  $m_2$  和  $m_3$ 。
- 2. 取水约为量热器内筒容量的 2/3，并称出内筒和水的质量 ( $m_2+m_1$ )，水温比室温高出 10℃左右，实验装置如图 15-2 所示。

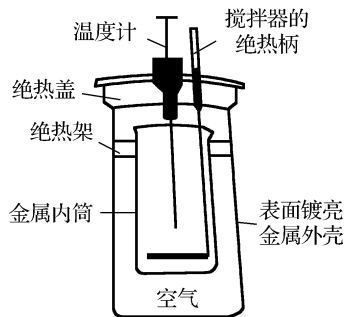


图 15-2 量热器

- 3. 在外筒内投入硅胶，把内筒放入并盖好，把温度计从孔中插入，读出此时的温度，之后每隔 1min 读一次温度计示数，记录 5 次。
- 4. 取适量的冰块，用毛巾擦干冰块表面的水后迅速投入水中，马上观察温度计的示数变化，并用搅拌器不断搅拌，加速熔解，记下温度降至室温时所需的时间。
- 5. 待温度稳定后，读出温度计示数，每隔 1min 记录一次温度，共 5 次。
- 6. 取出量热器内筒，称其总质量  $m$ ，冰的质量  $m_0 = m - (m_1+m_2+m_3)$ ，并用排水法测量进入水中的温度计体积  $V$ 。
- 7. 整理数据并用记录的温度  $t$  和时间  $\tau$  做  $t-\tau$  图。
- 8. 依据冷却图线分析，选择适当的冰、水质量，再做一次实验。
- 9. 最后计算出冰的熔解热，并分析实验误差。

【实验数据记录与处理】

- 1. 数据记录。  
水的质量为  $m_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  g；量热器内筒质量为  $m_2 = \underline{\hspace{2cm}}$  g；搅拌器的质量为  $m_3 = \underline{\hspace{2cm}}$  g；  
冰、水、量热器内筒、搅拌器总质量  $m = \underline{\hspace{2cm}}$  g；冰的质量为  $m_0 = \underline{\hspace{2cm}}$  g； $V = \underline{\hspace{2cm}}$  cm<sup>3</sup>。

测量次数	1	2	3	4	5	冰投水中	降至室温 $\theta$	8	9	10	11	12
温度 $t/^\circ\text{C}$												
时间 $T/\text{s}$												

注：1~5、8~12 测量过程，每隔 1min 测量一次；“冰投水中”和“降至室温”测量过程，需要如实记录温度及时间。

- 2. 运用 Origin 软件作  $t-\tau$ （温度随时间变化）图。
- 3. 求冰的熔解热。
- 4. 误差不确定度，按标准形式写出实验结果。

【注意事项】

- 1. 为了尽可能使系统与外界交换的热量达到最小，除了使用量热器以外，在实验操作过程中也必须注意，例如，不应该用手去握量热器的任何部分；不在阳光的直接照射下



或空气流动太快的地方（如通风过道、风扇旁）进行实验；冬天要避免接近火炉或者暖气旁做实验。

2. 当系统与外界温度差越大时，它们之间传递热量越快；时间越长，传递的热量越多。因此，在进行量热实验时，要尽可能使系统与外界温度差小些，并尽量使实验过程迅速进行。

3. 一个系统的温度只有在平衡态时才有意义，因此计温时必须使系统温度达到稳定和均匀；用温度计的指示值代表系统温度，必须使系统温度计之间达到热平衡。

4. 要选取透明、清洁的水。整个实验过程中要不断地轻轻搅拌。

5. 注意维护温度计、玻璃液体（水银或者酒精）温度计容易折断，水银泡更容易破碎，水银逸出会造成严重的污染。

### 【思考题】

1. 混合量热法必须满足什么实验条件？本实验是如何从仪器、实验安排和操作等各方面来力求实现的？

2. 怎样通过测试，找到何时的  $t_1$  和  $t_2$ ，从而使系统与外界环境的热交换可以忽略？

3. 冰块投入量热器时，若冰块外尚有水层，对实验结果有何影响？

## 实验十六 水的汽化热的测定

### 【实验目的】

1. 掌握用量热器测定水在沸腾时的汽化热。

2. 了解减小实验误差的方法。

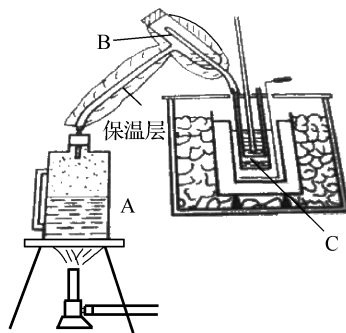
### 【仪器和用具】

量热器，水银温度计（ $0.1^\circ\text{C}$ ），冷凝器，天平，蒸汽发生器，蒸汽过滤器，小量筒。

### 【实验原理】

液体的汽化有蒸发和沸腾两种不同的形式。蒸发是发生在液体表面的汽化过程，在任何温度下都在进行；沸腾是在整个液体内部发生的汽化过程，只在沸点下才能进行。 $1\text{kg}$  液体汽化时所需要的热量称为汽化热。物质由气相转化为液相的过程称为凝结，凝结时要放出在同一条件下汽化所吸收的热量。

本实验即从测量凝结时放出的热量来测定水的汽化热。如图 16-1 所示实验装置，从蒸汽发生器出来的蒸汽，经过蒸汽过滤器将蒸汽中的小水滴分离出来之后进入冷凝器，在冷凝器中蒸汽凝结成水，放出的热量使量热器及其中的水和冷凝器的温度升高。



A—蒸汽发生器；B—蒸汽过滤器；C—冷凝器

图 16-1 测量水的汽化热实验装置

设蒸汽的质量为  $m$ ，沸点温度为  $t_2$ （1 个标准大气压下水的沸点为  $100^\circ\text{C}$ ），凝结后温度为  $\theta$ ，水在沸点时的汽化热为  $L$ ，则蒸汽放出的热量为  $mL + m(t_2 - \theta)c_0$ ， $c_0$  为水的比热容。量热器整体温度由  $t_1$  升至  $\theta$ ，则量热器整体吸收的热量为  $(m_0c_0 + m_1c_1 + m_2c_2 + C')(\theta - t_1)$ ， $m_0$  为量热器中原有的水的质量， $m_1$ 、 $c_1$  为量热器（含搅拌器）的质量和比热容， $m_2$ 、 $c_2$  为冷凝器的质量和比热容， $C' = 1.9V \cdot \text{cm}^3$  为温度计插入水中的部分的热容， $V$  为温度计插入水中部分的体积。不考虑其他的热损失，则下式成立

$$mL + m(t_2 - \theta)c_0 = (m_0c_0 + m_1c_1 + m_2c_2 + C')(\theta - t_1) \quad (16-1)$$

$$L = \frac{1}{m}(m_0c_0 + m_1c_1 + m_2c_2 + C')(\theta - t_1) - (t_2 - \theta)c_0 \quad (16-2)$$

### 【实验内容与步骤】

1. 按照如图 16-1 所示安装实验装置，并给蒸汽发生器加热。
2. 分别称量量热器的质量  $m_1$  和冷凝器的质量  $m_2$ ，并将冷凝器放入量热器中。
3. 用烧杯盛冷水称出其质量  $m'$ ，将水倒入量热器（量热器高的 3/4）中，再称出烧杯质量  $m''$ ，则倒入量热器中水的质量为  $m_0 = m' - m''$ （使水温低于  $t_0$  室温  $5^\circ\text{C}$  左右）。
4. 将温度计插入量热器中，开始测水温  $t_1$  并计时，以后每 1min 测一次。当蒸汽从蒸汽过滤器喷出一段时间之后，将其和冷凝器接通，记录接通的时间并在不断搅拌中继续测温度。当水温和室温接近于  $t_0 - t_1 = \theta - t_0$  时停止通汽，并继续搅拌，注意测出最高的温度值  $\theta$ 。
5. 取出冷凝器，擦干其外侧，称出其质量  $m'_2$ ，则凝结水的质量为  $m = m'_2 - m_2$ 。
6. 测量温度计插入水中部分的体积  $V$ 。
7. 计算汽化热  $L$  及其不确定度。

### 【实验数据记录与处理】

#### 1. 数据记录

##### （1）蒸汽和冷凝器接通前记录的数据

量热器的质量  $m_1 = \underline{\hspace{1cm}}$  g; 冷凝器质量  $m_2 = \underline{\hspace{1cm}}$  g; 烧杯盛冷水质量  $m' = \underline{\hspace{1cm}}$  g; 烧杯质量  $m'' = \underline{\hspace{1cm}}$  g; 倒入量热器中水的质量  $m_0 = m' - m'' = \underline{\hspace{1cm}}$  g; 室温  $t_0 = \underline{\hspace{1cm}}$  °C。

(2) 蒸汽与冷凝器接通至停止通汽记录的数据

测量次数	1	2	3	4	5	接通蒸汽	7	8	9	10	11	12	最高温度	...
温度 $t$ /°C														
时间 $\tau$ /s														

说明: 1~5 和 7~12 测量过程, 每隔 1min 测量一次; “接通蒸汽” 和 “最高温度” 测量过程需要如实记录温度及时间。

(3) 取出冷凝器后需要记录的数据

冷凝器 (已擦干) 质量  $m'_2 = \underline{\hspace{1cm}}$  g; 凝结水的质量为  $m = m'_2 - m_2 = \underline{\hspace{1cm}}$  g;

温度计插入水中部分的体积  $V = \underline{\hspace{1cm}}$  cm<sup>3</sup>; 水的沸点  $t_0 = \underline{\hspace{1cm}}$  °C; 最高温度  $\theta = \underline{\hspace{1cm}}$  °C。

## 2. 数据处理

(1) 水的汽化热  $L = \frac{1}{m}(m_0 c_0 + m_1 c_1 + m_2 c_2 + C')(\theta - t_1) - (t_2 - \theta) c_0 = \underline{\hspace{1cm}}$  J/°C。

(2) 计算不确定度。

(3) 按标准形式写出实验结果。

## 【思考题】

1. 不同大气压下, 水的沸点是否相同?
2. 能否设计一个小型电加热器, 将蒸汽发生器和过滤器结合在一起?

# 实验十七 金属丝的线膨胀系数的测量

## 【实验目的】

1. 掌握调整光杠杆和望远镜的基本要领。
2. 学会使用线胀系数仪测定金属的线膨胀系数。
3. 掌握几种长度测量的方法及其误差分析。

## 【仪器和用具】

线胀系数仪, 光杠杆, 尺读望远镜, 温度计 (最小刻度 0.2°C), 钢卷尺, 游标卡尺, 待测金属棒, 实验装置如图 17-1 所示。

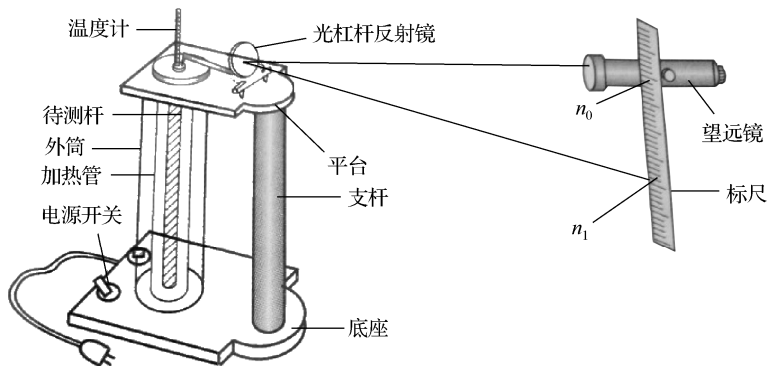


图 17-1 光杠杆测金属杆的线膨胀系数实验装置图

### 【实验原理】

固体的长度一般随温度的升高而增大，这种现象称为线膨胀。长度的变化大小取决于温度的改变、材料的种类和材料原来的长度。实验表明，在一定的温度范围内，原长为  $L$  的物体，受热后其伸长量  $\Delta L$  与其温度的增加量  $\Delta t$  近似成正比，与原长亦成正比，即

$$\Delta L = \alpha L \Delta t \quad (17-1)$$

式中， $\alpha$  是固体的线膨胀系数，单位是  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。不同材料，线膨胀系数不同；对同一种材料， $\alpha$  本身与温度稍有关，但对于绝大多数的固体，在温度变化不太的范围内，可以把它视为常数。

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{L(t_2 - t_1)} \quad (17-2)$$

$$\Delta L = \frac{b}{2D}(x_2 - x_1) \quad (17-3)$$

将式 (4-3) 代入式 (4-2)，可得出光杠杆法测线膨胀系数的公式为

$$\alpha = \frac{b(x_2 - x_1)}{2LD(t_2 - t_1)} \quad (17-4)$$

式中， $\alpha$  为固体的线膨胀系数； $b$  为光杠杆前足尖连线与后足尖之间的垂直距离； $D$  为镜面到直尺的距离； $L$  为待测物（杆）的原长； $t_1$ 、 $t_2$  分别为杆处于原长时的温度、伸长量为  $\Delta L$  时的温度； $x_1$ 、 $x_2$  分别为  $t_1$  与  $t_2$  温度时标尺上对应的读数。

### 【实验内容与步骤】

1. 用卷尺测量杆长  $L$ ，记录实验开始前的温度  $t_1$ ，温度计放入管内适当的位置。
2. 光杠杆的两前足放于平台槽内，后足立于被测杆顶端，并使三足尖尽可能在一水平面上。
3. 调节光杠杆：先调节其臂长  $b$ ，使两前足置于槽内，后足能置于钢丝夹头的圆柱体的上端即可，然后调节光杠杆镜面，使镜面与平台大致垂直。

4. 调节望远镜, 使望远镜与光杠杆反射镜等高, 先调节望远镜目镜下的螺丝, 使望远镜大致水平, 然后将望远镜移近镜面, 使两者等高, 最后移动镜尺支架, 使望远镜离反射镜镜面  $1\sim 2\text{m}$ 。

5. 将眼睛从望远镜外沿着准星方向观察反射镜中是否有标尺的像, 若没有, 则左右移动镜尺支架, 直到标尺像出现在反射镜中, 微调光杠杆镜面, 使标尺零刻度线成像在反射镜中央。

6. 转动目镜, 观察目镜的十字叉丝情况, 直到叉丝清晰成像, 然后调节调焦手轮, 使从望远镜中看到的反射镜中的标尺成像清晰。注意反复调节, 当晃动眼睛时, 十字叉丝与标尺刻度线之间无相对移动后, 即可认为消除了视差。

7. 微调光杠杆镜面的倾角和望远镜目镜下的升降螺丝, 使从望远镜中观察到的标尺零刻度在十字横丝附近。

8. 接通电源加热被测杆, 每隔  $3^\circ\text{C}$  记录一次标尺的读数。

9. 测量  $D$ 、 $b$ 。用钢卷尺测出镜面到直尺的距离  $D$ ; 将光杠杆在白纸上轻轻压出三个足尖痕, 用游标卡尺测其后足尖到两前足连线的垂直距离  $b$ 。

10. 求出待测金属杆的线膨胀系数, 并求出测量结果的标准不确定度。

### 【注意事项】

1. 实验系统调好后, 一旦开始测量, 在实验过程中绝对不能对系统的任一部分进行任何调整或者干扰, 否则, 所有数据将重新再测。

2. 实验前不要按“加热”开关, 以免为恢复加热前温度而延误实验时间, 或因短时间内温度忽升忽降而影响实验测量的准确度。

3. 为了避免体温传热对炉内外热平衡扰动的影响, 不要用手抓握待测试件。

### 【实验数据记录与处理】

#### 1. 数据记录

待测金属杆原长  $L = \underline{\hspace{2cm}}\text{m}$ ; 实验开始前温度  $t_1 = \underline{\hspace{2cm}}^\circ\text{C}$ ; 最高温度  $t_2 = \underline{\hspace{2cm}}^\circ\text{C}$ ;

光杠杆前足尖连线与后足尖之间的垂直距离  $b = \underline{\hspace{2cm}}\text{mm}$ ; 镜面到直尺的距离  $D = \underline{\hspace{2cm}}\text{m}$ ;

测量次数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	...
温度 $t/^\circ\text{C}$									
长度 $x/\text{mm}$									

注: 每隔  $3^\circ\text{C}$  记录一次标尺的读数,  $x_1$  为直尺上的最初读数,  $x_2$  为最高温度时对应的读数。

#### 2. 数据处理

(1) 计算线膨胀系数  $\alpha$ 。根据  $\alpha = \frac{b(x_2 - x_1)}{2LD(t_2 - t_1)} = A \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)}$  (令  $A = \frac{b}{2DL}$ ), 利用实验测得

的  $x_i$ 、 $t_i$  数据作  $x-t$  图, 求出直线的斜率  $\frac{\alpha}{A}$ , 从而求出线膨胀系数  $\alpha = \underline{\hspace{2cm}}^\circ\text{C}^{-1}$ 。

## (2) 计算不确定度

金属杆  $L$ 、光杠杆常数  $b$  及平面镜到标尺的距离  $D$  都是单次测量值，都不考虑 A 类不确定度分量，只考虑 B 类分量，即主要由仪器误差限决定。

$$\Delta\alpha = \bar{\alpha} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(t_2 - t_1)}{t_2 - t_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(x_2 - x_1)}{x_2 - x_1}\right)^2} = \text{---}^{\circ}\text{C}^{-1}。$$

(3) 表达式： $\alpha + \Delta\alpha = \text{---}^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

## 【思考题】

1. 设有各向同性的某固体材料线膨胀系数为  $\alpha$ ，则该材料的体膨胀系数应为多少？
2. 能否设计一个实验方案测定液体（各向同性）的体膨胀系数？

## 实验十八 稳态平板法测量非良导体的导热系数

## 【实验目的】

1. 了解稳态平板法测非良导体的导热系数的原理和方法。
2. 学会测量待测材料的导热系数。

## 【仪器和用具】

YJ-HD-5 导热系数测量仪（如图 18-1、图 18-2 所示），游标卡尺，待测材料。

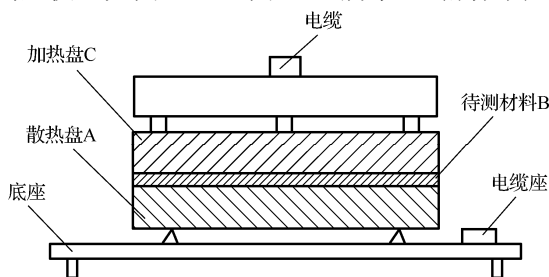


图 18-1 导热系数的测量实验装置

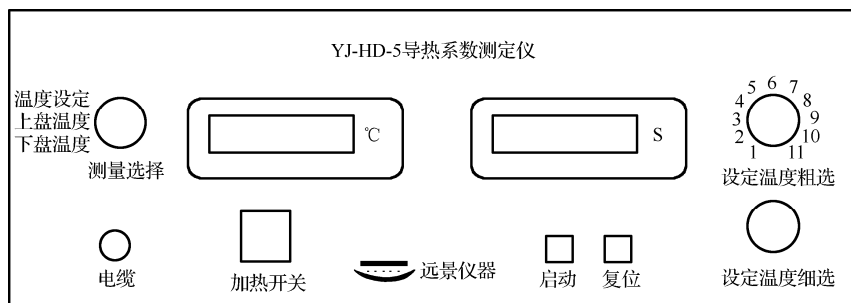


图 18-2 YJ-HD-5 导热系数测量仪面板

## 【实验原理】

导热系数是反映材料热性能的重要物理量,热传导是热交换的三种(热传导、对流和辐射)基本形式之一,当物体内部有温度梯度存在时,就有热量从高温处传到低温处,这种现象称为热传导。根据傅里叶热传导定律,有

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} dS \quad (18-1)$$

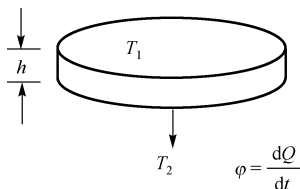


图 18-3 待测样品

式中,  $\frac{dQ}{dt}$  为传热速率,  $\frac{dT}{dx}$  是与面积  $dS$  垂直的方向上的温度梯度,“-”表示热量由高温区域传向低温区域,  $\lambda$  是导热系数(物体导热能力的大小,单位  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )。

如图 18-3 所示,设待测样品为一平板,在稳定导热条件下(上下平面有稳定的温度  $T_1$  和  $T_2$ 、侧面近似绝热),则有导热系数公式

$$\lambda = \frac{m_A c_A h_B (R_A + 2h_A)}{2\pi R_B^2 (T_1 - T_2) (R_A + h_A)} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (18-2)$$

式中,  $m_A$ 、 $h_A$ 、 $R_A$  和  $h_B$ 、 $R_B$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  分别为图 18-1 中散热盘 A 的质量、厚度、半径和待测板的厚度、半径、上下表面温度。

这些量都可以由实验测量出准确值,  $c_A$  为已知常数,  $c_A = c_{\text{铝}} = 0.904 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ , 因此, 只要求出  $\frac{dT}{dt}$ , 就可求出导热系数  $\lambda$ 。

## 【实验内容与步骤】

1. 如图 18-1、图 18-2 所示, 安装好实验装置, 连接好电缆线, 打开电源开关, “测量选择” 开关旋至 “温度设定” 挡, 调节 “设定温度粗选” 和 “设定温度细选” 旋钮, 设定加热盘 C 盘为所需的温度值。

2. 打开加热开关, 将 “测量选择” 开关拨向 “上盘温度” 挡, 观察 C 盘温度的变化, 直至 C 盘温度恒定在设定的温度。

3. 再将 “测量选择” 开关拨向 “下盘温度” 挡, 观察 A 的温度变化, 若每分钟的变化  $\Delta T_A \leq 0.1^\circ\text{C}$ , 则可认为达到稳恒态, 记下此时的 A 和 C 的温度  $T_2$  和  $T_1$ 。

时间测量: 按动 “暂停/启动” 按钮一下, 即开始计时, 再按动 “暂停/启动” 按钮一下, 即停止计时, 按动 “复位” 按钮, 即归零。

4. 在读取稳态时的  $T_2$  和  $T_1$  之后, 拿走样品 B, 让 A 盘直接与加热盘 C 底部的下表面接触, 加热铝盘 A, 使 A 盘温度上升到比  $T_2$  高  $6^\circ\text{C}$  左右, 再移去加热盘 C, 关闭加热开关, “测量选择” 开关拨向 “下盘温度” 挡, 让铝盘 A 通过外表面直接向环境散热 (自然冷却), 每隔 1min 记下相应的温度值, 作出 A 的冷却曲线, 求出 A 盘在  $T_2$  附近的冷却速率  $\frac{dT}{dt}$ 。

5. 用游标卡尺测出待测板 B 的厚度  $h_B$  和半径  $R_B$ ，以及 A 盘的厚度  $h_A$  和半径  $R_A$ ，称量 A 盘的质量  $m_A$ 。

6. 根据式（18-2）求出等测材料的导热系数  $\lambda$ 。

### 【注意事项】

1. 供电电源插座必须良好接地。
2. 在整个电路接通好，检查无误之后才能打开电源开关。
3. 严禁带电情况下插或拔电源插头。
4. 三个盘要叠放整齐。
5. 加热过程中不要改变设定温度。

### 【实验数据记录与处理】

#### 1. 数据记录

表 18-1 一次测量的数据

$h_A/\text{cm}$	$R_A/\text{cm}$	$m_A/\text{g}$	$h_B/\text{cm}$	$R_B/\text{cm}$	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$

表 18-2 多次测量的数据（每隔 1min 记下相应的温度值）

$t/\text{min}$	0	1	2	3	4	5	6	7
$T/^\circ\text{C}$								
$t/\text{min}$	8	9	10	11	12	13	14	15
$T/^\circ\text{C}$								

#### 2. 数据处理

(1) 根据表 18-2 测量的数据，作  $T-t$ （温度随时间变化）冷却速率图，求出  $\frac{dT}{dt}$ 。

(2) 根据式子  $\lambda = \frac{m_A c_A h_B (R_A + 2h_A)}{2\pi R_B^2 (T_1 - T_2)(R_A + h_A)} \cdot \frac{dT}{dt}$  计算导热系数  $\lambda$ 。

(3) 计算不确定度。

### 【思考题】

1. 如果三个盘叠放得不整齐，会给测量结果带来怎样的影响？
2. 加热过程中为何不能改变设定温度？



## 实验十九 用落球法测液体的粘度

### 【实验目的】

1. 观察液体的粘滞现象。
2. 学会用落球法测液体的粘度。

### 【仪器和用具】

读数显微镜，秒表，游标卡尺，米尺，镊子，甘油。

### 【实验原理及应用】

对流体粘滞性的研究在物理学、化学化工、生物工程、医疗、航空航天、水利、机械润滑和液体传动等领域有广泛的应用。

当一种流体相对于其他固体、流体运动，或同种流体的各层速度不同时，流体与固体间或任意两层流体之间将互施作用力，以阻碍流体与固体或各层流体之间的相对运动，这种现象称为粘滞现象。实验表明，粘滞力（ $\tau$ ）的方向平行于接触表，其大小与接触面面积（ $S$ ）及接触面处的速度梯度（ $\frac{du}{dy}$ ）成正比（ $F = \mu \frac{du}{dy} S$ ），比例系数  $\mu$  称为粘度，表征流体粘滞性的强弱。

如果在流体中运动的物体是一个球体且不产生旋涡，设小球的密度为  $\rho$ ，体积为  $V$ ，当小球在密度为  $\rho'$  的液体中降落时，实验时小球沿内半径为  $R$  的竖直玻璃大量筒的轴线降落，受到重力  $\rho V g$ 、浮力  $\rho' V g$  和粘滞力  $F$  的作用，则根据牛顿第二定律、斯托克斯公式及其适用条件等可推出粘度  $\mu$

$$\mu = \frac{2(\rho - \rho')gr^2}{9v_0 \left(1 + k \frac{r}{R}\right)} = \frac{gd^2(\rho - \rho')}{18v_0 \left(1 + 2.4 \frac{d}{D}\right)} \quad (19-1)$$

式中， $d$  为小球的直径， $D$  为量筒的内径。在小球密度  $\rho$ 、液体密度  $\rho'$  和重力加速度  $g$  已知的情况下，只要测得小球直径  $d$  和量筒内径  $D$  及小球沉降的终极速度  $v_0$ ，就可由式（19-1）计算出流体的粘度  $\mu$ 。

### 【实验内容与步骤】

1. 调节盛甘油的量筒，使其中心轴处于竖直位置。
2. 将小球清洗干净，确保小球表面无其他油污，用读数显微镜测量小球的直径，在不同方位上测 6 次，求平均值  $\bar{d}$  和  $\sigma_d$ 。
3. 观察液体的粘滞现象。用镊子夹起小球，先将小球在甘油中浸一下，然后细心观察小球自液面的中心由静止开始加速到终极速度，最后匀速下降的全过程，重复观察 3 次。对于

小钢球，当它离筒底还有 5~6cm 时，就用磁铁先将小球吸到量筒内壁，然后沿筒壁缓慢上移磁铁，将钢球吸出，或用漏网打捞出来。根据观察或用公式估算初步确定小球开始匀速下降的位置  $A$ ， $A$  位置估算式为（ $y$  为液面与  $A$  位置的距离）

$$y = 0.292 \frac{\rho(\rho - \rho')gr^4}{\mu} \quad (19-2)$$

4. 正式测量。用镊子夹起小球，先将小球在甘油中浸泡一下，然后轻轻放在液面的中心，使其自由下落，用秒表测量小球匀速下降通过路程  $AB = S$  所需的时间  $t$ ， $AB$  距离约为 20m，则  $v_0 = \frac{S}{t}$ ，重复测 6 次，记录测量数据。

5. 用游标卡尺测出量筒的内径  $D$ ，实验过程尽可能保持温度不变。

6. 根据式（19-1）计算粘度  $\mu$  和不确定度。

### 【注意事项】

1. 保持量筒竖直，流体处于静止状态，球要圆滑、干净，实验前用待测液浸润，并尽可能让小球贴近液面沿量筒中轴线下落。

2. 为了确保待测液体温度不变，实验中不要用手握量筒。

3. 待测液体必须是不包含悬浮物或弥散物的均匀液体，粘度较大，球半径很小且在液体中速度比较低，球在液体中不产生涡旋。

### 【实验数据记录与处理】

#### 1. 数据记录

当地重力加速度  $g = \underline{\hspace{1cm}} \text{m/s}^2$ ；钢球密度  $\rho = \underline{\hspace{1cm}} \text{kg/m}^3$ ；甘油密度  $\rho' = \underline{\hspace{1cm}} \text{kg/m}^3$ ；

量筒内径  $D = \underline{\hspace{1cm}} \text{m}$ ；小球匀速下降通过的路程  $S = \underline{\hspace{1cm}} \text{m}$ 。

表 19-1 测量小球直径（单位： $\times 10^{-3} \text{m}$ ）

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值
$x_{\text{左}}$							
$x_{\text{右}}$							
$d = x_{\text{右}} - x_{\text{左}}$							$\bar{d} =$
$ d - \bar{d} $							

$x_{\text{左}}$ 、 $x_{\text{右}}$  分别表示测量小球时读数显微镜左侧和右侧的读数。

表 19-2 测量小球匀速下落的时间及速度

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值
时间 $t/\text{s}$							
$v_0 / (\text{m/s})$							$\bar{v}_0 = \underline{\hspace{1cm}} \text{m/s}$

## 2. 数据处理

(1) 计算粘度  $\mu = \frac{gd^2(\rho - \rho')}{18v_0 \left(1 + 2.4 \frac{d}{D}\right)} = \text{——}^\circ$

(2) 计算不确定度。

(3) 写出结果表达式。

### 【思考题】

1. 如何减少或避免判断小球通过量筒  $A$ 、 $B$  两点时的视差？
2. 如何确定实验中量筒的  $A$ 、 $B$  两点（小球匀速运动的计时点）？

## 实验二十 中、高真空的获得与测量

### 【实验目的】

1. 熟悉简单的高真空系统。
2. 掌握获得高真空的手段及测量方法。
3. 学习真空系统的基本抽气方程。

### 【仪器和用具】

高真空系统。

### 【实验原理】

一个真空系统，工作时除了真空泵的抽气因素外，还存在着相反因素，如器壁本体材料及内部零件表面的气体脱附（出气），外界向系统的漏气及反扩散等。在任何瞬间，容器中的压强实际上是由这两种相反因素间的动态平衡所决定的。

设被抽容器体积为  $V$ ，经管道与真空泵相连，则泵的抽速为

$$S_p = \frac{dV}{dt}$$

由于管道对气流的阻碍，容器出口处的有效抽速降为  $S_e$  ( $S_e < S_p$ )。气体在流动中，其流量定义为单位时间内流过的气体量，而气体量由气体压强与体积的乘积  $PV$  所决定，则对于上述系统，每秒从容器抽掉的气体量为  $PS_e$ 。被抽容器除了原有大气之外，还存在器壁本体材料及内部零件表面的气体出气量（脱附率） $Q_D$  和漏气率  $Q_L$ 。这样每秒从容器漏掉的气体量应等于容器空间中气体量的减少率及由各种气源向容器注入气体量增加率之差，即

$$PS_e = \frac{d(PV)}{dt} + Q_D + Q_L = -V \frac{dP}{dt} + Q_D + Q_L \quad (20-1)$$

此即真空系统的基本抽气方程。若求出压强  $P$  作为时间的函数，便掌握了抽气过程的基本情况。

1. 当抽气进行了足够长时间后，容器压强不再变化，此时即为极限压强  $P_u$ 。式 (20-1)

中令  $\frac{dP}{dt} = 0$  就得极限压强

$$P_u = \frac{Q_D + Q_L}{S_e} \quad (20-2)$$

故要想得到低的极限压强，应尽量提高有效抽速，并降低漏气量与出气量。

2. 在忽略容器漏气量  $Q_L$  及气体出气量  $Q_D$  时，式 (20-1) 变为

$$S_e = -V \cdot \frac{dP}{P dt} = -V \cdot \frac{d(\ln P)}{dt} \quad (20-3)$$

利用此式可近似计算有效抽速。

3. 对于封闭的真空系统（容器与真空泵隔绝）， $S_e = 0$ ，则压强的变化应遵从以下方程

$$\frac{dP}{dt} = \frac{Q_D + Q_L}{V} \quad (20-4)$$

式中， $Q_D$  是有限的，将逐渐减小，故由它引起  $P$  的变化如图 20-1 中曲线 1；对于一定的漏孔， $Q_L$  是恒定不变的，由它引起  $P$  的变化如图 20-1 中曲线 2；在实际容器中， $P$  的变化表现为前两者的叠加，如图 20-1 中曲线 3。

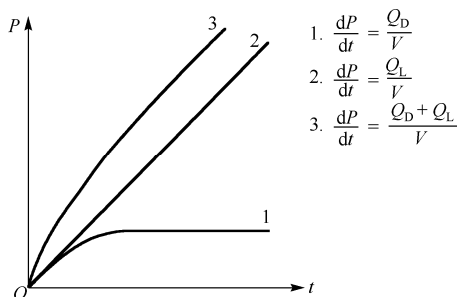


图 20-1 真空系统漏气和出气特征

由此可知，根据实测  $P-t$  曲线的情况，即可判断真空系统是否存在漏气现象。在漏气量  $Q_L$  可以忽略的情况下，可求得出气量为

$$Q_D = V \cdot \frac{dP}{dt} \quad (20-5)$$

## 【实验内容与步骤】

1. 了解整个真空系统的结构（参见图 20-2），拆装金属旋片式机械泵和油扩散泵，进一步了解其内部结构及工作原理。

2. 检查所有阀门是否全都关闭（关闭所有阀门），打开机械泵进行抽气。

3. 数分钟后，打开旁通阀门及前级阀门，通过机械泵对真空室及扩散泵进行抽气。

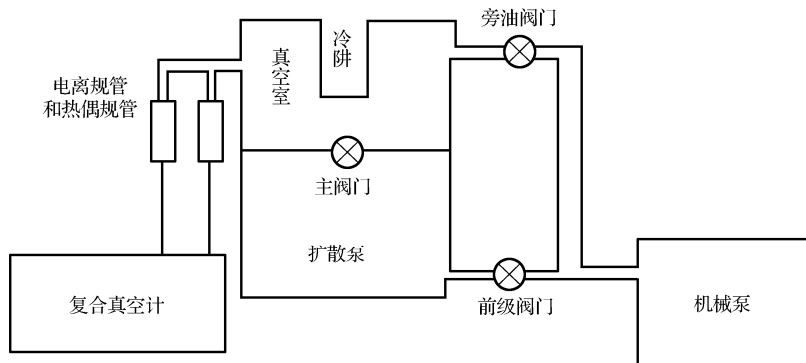


图 20-2 真空系统图

4. 打开热偶真空计进行测量（先接通真空计电源，然后调节加热电流，再进行测量）。
5. 当真空度达到  $10^{-3}$ Torr 后，开启冷却水，接通扩散泵加热电源进行预热。
6. 扩散泵预热 30min 后，关闭旁通阀门，打开主阀门，这时扩散泵开始对真空室抽气。
7. 当热偶真空计读数达到满量程后，关闭热偶真空计，打开电离真空计进行测量（先调节发射电流值为 5mA，然后经过调零、满刻度校准后，即可进行测量）。
8. 抽至极限真空度后，关闭主阀门，测出一压强与时间的关系曲线（ $P-t$  曲线），进而求出每点所对应的气体出气量，即式（20-5）中的  $Q_D$ 。
9. 当真空度约为  $10^{-3}$ Torr 时，迅速打开主阀门，测出  $P-t$  值，至极限真空。可先作出  $\ln P-t$  曲线，进而作出  $S_e-t$  曲线。
10. 在冷阱中加入液氮后，观察其效果，测出极限真空度。
11. 关闭主阀门，测出  $P-t$  曲线，进而求出加液氮后每点所对应的气体出气量（脱附率） $Q_D$ 。
12. 关闭电离真空计，切断扩散泵加热电源，此时不关冷却水和机械泵，待扩散泵泵体冷却后，关闭前级阀门，然后关闭机械泵（此时应对机械泵前级充气，以免返油）和冷却水。

### 【注意事项】

1. 检查各连线处密封圈是否损坏，如有损坏及时更换。
2. 真空度低，抽空时间明显增长。当冷凝器完全堵塞时，将会产生抽气时间短、真空度明显提高，此时测得的真空度不准确，应引起注意。

### 【实验数据记录与处理】

1. 抽至极限真空后关闭主阀门，记录的  $P-t$  值如表 20-1 所示（参考数据）。

表 20-1  $P-t$  值

时间 $t/s$	0	4.26	10.54	16.34	28.20	44.31	58.26	71.26	84.85
压强 $P/10^{-5}$ Torr	4.4	5	8	10	15	20	25	30	35
时间 $t/s$	95.39	107.13	117.91	138.89	158.51	177.65	196.89	213	
压强 $P/10^{-5}$ Torr	40	45	50	60	70	80	90	100	

做出  $P$ - $t$  曲线图，如图 20-3 所示。

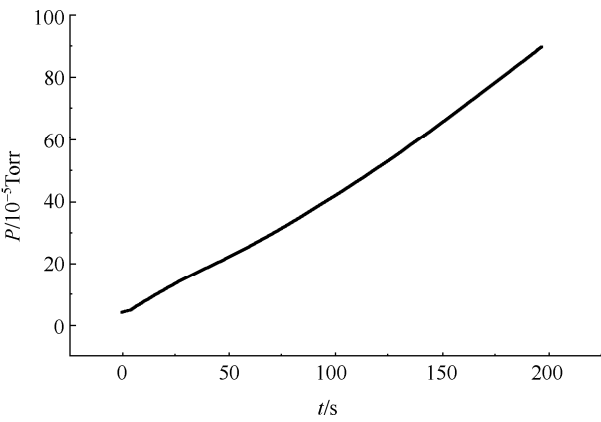


图 20-3  $P$ - $t$  曲线图

由  $P$ - $t$  曲线图和式（20-5）可得  $Q_D$ - $t$  曲线图，如图 20-4 所示。

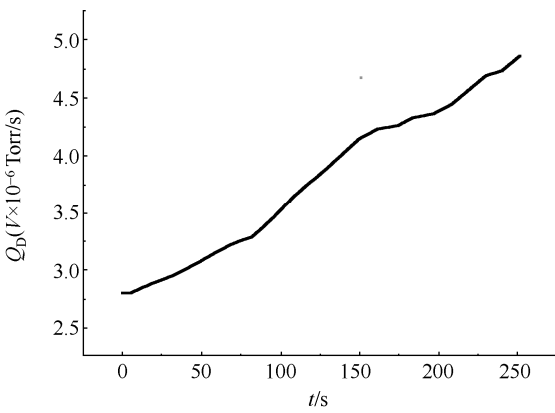


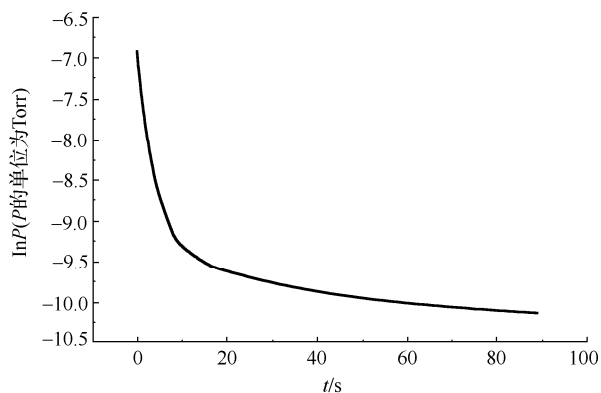
图 20-4  $Q_D$ - $t$  曲线图

2. 打开主阀门抽至极限真空，得到  $P$ - $t$  值如表 20-2 所示（参考数据）。

表 20-2  $P$ - $t$  值

时间 $t/s$	0	1.9	4.2	8.2	12.9	17.2	26.4	34.1	44.8	62	89
压强 $P/10^{-5}$ Torr	100	40	20	10	8	7	6	5.5	5	4.5	4

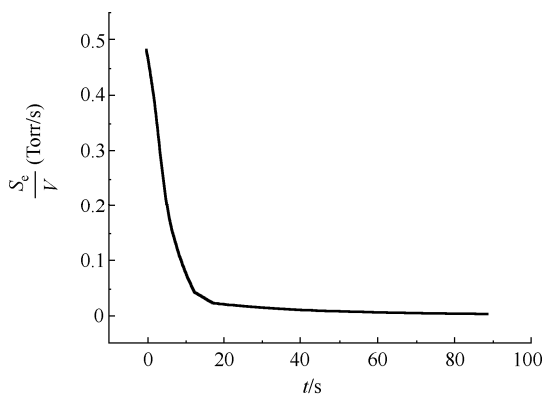
由 Origin 画出  $\ln P$ - $t$  曲线图如图 20-5 所示。

图 20-5  $\ln P-t$  曲线图

由  $\ln P-t$  曲线图及公式

$$S_e = -V \cdot \frac{dP}{Pdt} = -V \cdot \frac{d(\ln P)}{dt}$$

易得  $S_e-t$  曲线图，如图 20-6 所示。

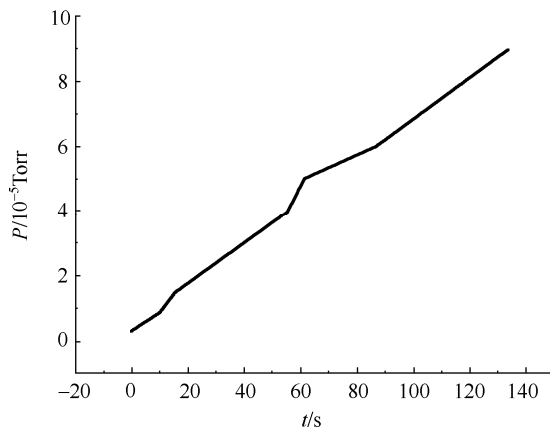
图 20-6  $S_e-t$  曲线图

3. 加入液氮抽至极限真空后，关闭主阀门，测出的  $P-t$  值如表 20-3 所示（参考数据）。

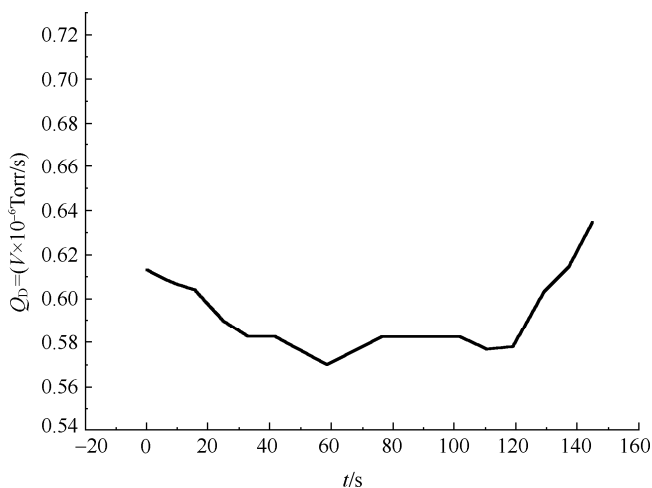
表 20-3  $P-t$  值

时间 $t/s$	0	3.66	6.90	10.00	15.38	23.59	31.84	39.79
压强 $P/10^{-6}$ Torr	3	5	7	9	15	20	25	30
时间 $t/s$	55.53	61.27	86.86	102.25	118.14	133.99	207.34	
压强 $P/10^{-5}$ Torr	40	5	6	7	8	9	15	

做出  $P-t$  曲线图如图 20-7 所示。

图 20-7  $P$ - $t$  曲线图

由  $P$ - $t$  曲线图和式 (20-5) 易得  $Q_D$ - $t$  曲线, 如图 20-8 所示。

图 20-8  $Q_D$ - $t$  曲线

本实验的主要误差在于记录压强  $P$  和对应的时间  $t$ , 需要同时记录对应的值, 关闭阀门后压强变化很快, 要注意分工合作。

### 【思考题】

本实验加液氮后, 极限真空度和气体出气量有何变化? 为什么?



## 实验二十一 温度传感器及其标定和应用

### 【实验目的】

1. 了解温度传感器的工作原理，熟悉温度传感器标定的方法。
2. 了解 Pt<sub>100</sub> 的温度效应。

### 【仪器和用具】

零度阻值为 100Ω 的 Pt<sub>100</sub> 铂电阻，热敏电阻 PTC、NTC 各一个，冰水温合物，热水器一个，电阻表，温度计等。

### 【实验原理】

#### 1. Pt<sub>100</sub> 铂电阻的测温原理

温度是一个历史很长的物理量，为了测量它，人们发明了许多方法。温度传感器通过测温元件将温度转化为电学量进行测量，具有反应时间快、可连续测量等优点。本实验对 Pt<sub>100</sub> 铂电阻特性进行实验研究，从而了解温度传感器及其标定和应用。和其他金属一样，铂 (Pt) 的电阻值随温度的变化而变化，并且具有很好的重现性和稳定性。利用铂的此种物理特性制成的传感器称为铂电阻温度传感器，通常使用的铂电阻温度传感器的零度阻值为 100Ω (即 Pt<sub>100</sub>)。铂电阻温度传感器精度高，应用温度范围广，是中低温区 (−200℃~650℃) 最常用的一种温度检测器，本实验即采用这种铂电阻作为标准测温器件来标定其他温度传感器的温度特性曲线，为此，首先要对铂电阻本身进行标定。

按 IEC751 国际标准，铂电阻温度系数 TCR 定义如下

$$TCR = (R_{100} - R_0) / (R_0 \times 100) \quad (21-1)$$

式中， $R_{100}$  和  $R_0$  分别是 100℃ 和 0℃ 时标准电阻值 ( $R_{100}=138.51\Omega$ ,  $R_0=100.00\Omega$ )，代入上式可得到 Pt<sub>100</sub> 的 TCR 为 0.003851。

Pt<sub>100</sub> 铂电阻的阻值随温度变化的计算公式如下

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \quad (-200^\circ\text{C} < t < 0^\circ\text{C}) \quad (21-2)$$

式中， $R_t$  表示在  $t^\circ\text{C}$  时的电阻值，系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为  $A = 3.908 \times 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $B = -5.802 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-2}$ ,  $C = -4.274 \times 10^{-12}^\circ\text{C}^{-4}$ 。

因为  $B$ 、 $C$  相较于  $A$  较小，所以公式可近似为

$$R_t = R_0(1 + At) \quad (0^\circ\text{C} < t < 850^\circ\text{C}) \quad (21-3)$$

为了减小导线电阻带来的附加误差，在本实验中，对用做标准测温器件的 Pt100 采用三线制接法。

## 2. 热敏电阻的温度特性原理

热敏电阻是阻值对温度变化非常敏感的一种半导体电阻，它有负温度系数和正温度系数两种。负温度系数热敏电阻（NTC）的电阻率随着温度的升高而下降；正温度系数热敏电阻（PTC）的电阻率随着温度的升高而升高。下面以 NTC 为例，分析其温度特性原理。

在一定的温度范围内，半导体的电阻率  $\rho$  和温度  $T$  之间有如下关系

$$\rho = A_1 e^{B/T} \quad (21-4)$$

式中， $A_1$  和  $B$  是与材料物理性质有关的常数， $T$  为绝对温度。对于截面均匀的热敏电阻，其阻值  $R_T$  可表示为

$$R_T = \rho \frac{l}{s} \quad (21-5)$$

将式 (21-4) 代入式 (21-5)，令  $A = A_1 l / s$ ，于是可得

$$R_T = A e^{B/T} \quad (21-6)$$

对一固定电阻而言， $A$  和  $B$  均为常数。对式 (21-6) 两边取对数，则有

$$\ln R_T = B \frac{1}{T} + \ln A \quad (21-7)$$

可以发现  $\ln R_T$  与  $\frac{1}{T}$  呈线性关系，在实验中测得各个温度  $T$  下的  $R_T$  值后，即可通过作图求出  $B$  和  $A$  值，代入式 (21-7)，即可得到  $R_T$  的表达式。式中  $R_T$  为元件在温度  $T$  (K) 时的电阻值 ( $\Omega$ )， $A$  为在某一较大温度时元件的电阻值 ( $\Omega$ )， $B$  为常数 (K)，其值与半导体材料的成分和制造方法有关。

热敏电阻的温度系数  $\alpha_T$  定义为

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} \quad (21-8)$$

## 【实验内容与步骤】

运用冰水混合物和沸水对  $Pt_{100}$  进行标定。

1.  $Pt_{100}$  的定标：观察  $Pt_{100}$  的电阻关于温度的函数关系式，将  $Pt_{100}$  分别浸入冰水混合物和沸水中，读出  $Pt_{100}$  测得的温度，完成测量温度与实际温度之间的换算。

2. 以  $Pt_{100}$  作为标准测温器件来定标实验室中的 NTC 温度传感器，温度范围控制在室温 ~ 100℃ 范围内。基于实验数据给出该器件的电阻温度曲线，并研究温度系数随温度的变化关系。

3. NTC 温度特性研究：将  $Pt_{100}$  作为测温元件，改变温度，测量 NTC 的电阻变化。

4. 用类似的方法研究（正温度系数热敏电阻）PTC 的电阻温度关系，结合实验数据寻找实验室提供的 PTC 器件的电阻温度关系的经验公式，并研究其温度系数。

【注意事项】

- 1. 注意作为标准测温器件的  $Pt_{100}$  的连接方法。
- 2. 注意减少实验过程中的人为读数误差。

【实验数据记录与处理】

- 1.  $Pt_{100}$  的定标实验数据记录如表 21-1 所示。

表 21-1  $Pt_{100}$  的定标实验数据表

实际温度/℃		
测温元件示数/℃		

由此得出  $t_{\text{实}}$  与  $t_{\text{测}}$  之间的关系。

- 2. NTC 温度特性研究数据记录（将  $Pt_{100}$  作为测温元件，改变温度，测量 NTC 的电阻变化），如表 21-2 所示。

表 21-2 NTC 温度特性研究数据表

$t_{\text{测}} / ^\circ\text{C}$	$t_{\text{实}} / ^\circ\text{C}$	$T/\text{K}$	$R/\text{k}\Omega$	$\ln R$	$\frac{1}{T} / \times 10^{-3}$

- (1) 运用数学软件画出  $\ln R$  关于  $\frac{1}{T}$  的图像。
  - (2) 运用数学软件，画出温度系数随温度的变化曲线。
  - (3) PTC 的电阻随温度的变化关系。
- 3. PTC 温度特性研究数据记录，如表 21-3 所示。

表 21-3 PTC 温度特性研究数据表

$t_{\text{测}} / ^\circ\text{C}$	$t_{\text{实}} / ^\circ\text{C}$	$T/\text{K}$	$R/\Omega$

- (1) 运用作图软件可将这些点在图上描绘出来。
- (2) 运用拟合手段，可得出 PTC 电阻的大致表达式。
- (3) PTC 的电阻随温度的变化关系。

【思考题】

- 1. 举例说明温度传感器的应用。
- 2. 建立一种温标，需要包含：选择某种物质（测温物质）的某一随温度变化属性（测温属性）来标志温度；选定固定点；对测温属性随温度的变化关系做出规定。此实验研究中固定点分别是多少？测温属性随温度的变化关系如何？

附录 A 中华人民共和国法定计量单位

表 A-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	电流	安[培]	A
质量	千克	kg	物质的量	摩[尔]	mol
时间	秒	s	发光强度	坎[德拉]	cd
热力学单位	开[尔文]	K			

表 A-2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

表 A-3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	用 SI 基本单位的表示式	其他表示
频率	赫[兹]	Hz	$s^{-1}$	—
力, 重力	牛[顿]	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$	—
压力, 压强, 应力	帕[斯卡]	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	$N \cdot m^{-2}$
能量, 功, 热	焦[耳]	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	$N \cdot m^{-1}$
功率, 辐射能量	瓦[特]	W	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-3}$	$J \cdot s^{-1}$
电荷量	库[仑]	C	$s \cdot A$	—
电势, 电压, 电动势	伏[特]	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$	$W \cdot A^{-1}$
电容	法[拉]	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	$C \cdot V^{-1}$
电阻	欧[姆]	$\Omega$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	$V \cdot A^{-1}$
电导	西[门子]	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$	$W \cdot A^{-1}$
磁通量	韦[伯]	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	$V \cdot s$
磁通量密度, 磁感应强度	特[斯拉]	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	$Wb \cdot m^{-2}$
电感	亨[利]	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$	$W \cdot A^{-1}$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	K	—
光通量	流[明]	lm	$cd \cdot sr$	—
光照度	勒[克斯]	lx	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$	$lm \cdot m^{-2}$
放射性活度	贝可[勒尔]	Bq	$s^{-1}$	—
吸收当量	戈[瑞]	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$	$J \cdot kg^{-1}$
剂量当量	希[沃特]	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$	$J \cdot kg^{-1}$

表 A-4 可与国际单位并用的我国法定计量单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	1min=60s
	[小]时	h	1h=60min=3600s
	天(日)	d	1d=24h=86400s
平面角	[角]	"	1" = ( $\pi$ /648000) rad ( $\pi$ 为圆周率)
	[角]	'	1' = 60" = ( $\pi$ /101800) rad
	度	°	1° = 60' = ( $\pi$ /180) rad
旋转速度	转每分	r · min <sup>-1</sup>	1r · min <sup>-1</sup> = (1/60) s <sup>-1</sup>
长度	海里	n mile	1n mile = 1 852 m(只用于航行)
速度	节	kn	1kn = 1n mile·h <sup>-1</sup> = (1 852/3 600)m · s <sup>-1</sup> (只用于航行)
质量	吨	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
	原子质量单位	u	1u ≈ 1.660 540 × 10 <sup>-27</sup> kg
体积	升	L	1 L = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
能	电子伏	eV	1eV ≈ 1.602 177 × 10 <sup>-19</sup> J
级差	分贝	dB	—
线密度	特[克斯]	tex	1tex = 10 <sup>-6</sup> kg · m <sup>-1</sup>

表 A-5 用于构成十进制倍数和分数单位的词头

因素	词头名称英文		词头符号	因素	词头名称英文		词头符号
10 <sup>1</sup>	十	deca	da	10 <sup>-1</sup>	分	deci	d
10 <sup>2</sup>	百	hecto	h	10 <sup>-2</sup>	厘	centi	c
10 <sup>3</sup>	千	kilo	k	10 <sup>-3</sup>	毫	milli	m
10 <sup>6</sup>	兆	mega	M	10 <sup>-6</sup>	微	micro	μ
10 <sup>9</sup>	吉[咖]	giga	G	10 <sup>-9</sup>	纳[诺]	nano	n
10 <sup>12</sup>	太[拉]	tera	T	10 <sup>-12</sup>	皮[可]	pico	p
10 <sup>15</sup>	拍[它]	peta	P	10 <sup>-15</sup>	飞[母托]	femto	f
10 <sup>18</sup>	艾[可萨]	exa	E	10 <sup>-18</sup>	阿[托]	atto	a

附录 B 常用物理常数表

表 B-1 基本和重要的物理常数

物理量	符号	数值	单位
真空中光速	$c$	$2.997\,924\,58\times10^8$	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
真空磁导率	$\mu_0$	$4\pi\times10^{-7}$	$\text{H}\cdot\text{A}^{-2}$
真空电容率	$\varepsilon_0$	$8.854\,187\,817\cdots\times10^{-12}$	$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$
牛顿引力常数	$G$	$6.674\,28(67)\times10^{-11}$	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
普朗克常数	$h$	$6.626\,068\,96(33)\times10^{-34}$	$\text{J}\cdot\text{s}$
基本电荷	$e$	$1.602\,176\,487(40)\times10^{-19}$	$\text{C}$
精细结构常数	$\alpha$	$7.297\,352\,537\,6(50)\times10^{-3}$	
里德堡常数	$R_\infty$	$1.097\,373\,156\,852(73)\times10^7$	$\text{m}^{-1}$
玻尔半径	$a_0$	$0.529\,177\,208\,59(36)\times10^{-10}$	$\text{m}$
电子质量	$m_e$	$0.910\,938\,215(45)\times10^{-30}$	$\text{kg}$
电子荷质比	$-e/m_e$	$-1.758\,820\,150(44)\times10^{11}$	$\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$
质子质量	$m_p$	$1.672\,621\,637(830)\times10^{-27}$	$\text{kg}$
质子荷质比	$e/m_p$	$0.957\,883\,392(24)\times10^8$	$\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$
中子质量	$m_n$	$1.674\,927\,211(84)\times10^{-27}$	$\text{kg}$
阿伏伽德罗常数	$N_A$	$6.022\,141\,79(30)\times10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
法拉第常数	$F$	$9.648\,533\,99(24)\times10^4$	$\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$
摩尔气体常数	$R$	$8.314\,472(15)$	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
玻尔兹曼常数	$k$	$1.380\,650\,4(24)\times10^{-23}$	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$
标准大气压	$p_0$	$1.013\,25\times10^5$	$\text{Pa}$
冰点绝对温度	$T_0$	$273.15$	$\text{K}$
标准状态下理想气体的摩尔体积	$V$	$22.413\,996\times10^{-3}$	$\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$
标准状态下声音在空气中的速度	$v$	$331.45$	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
标准状态下干燥空气密度	$\rho_a$	$1.293$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

注：本表中括号内的数字是给定值最后两位数字中的一个标准偏差的不确定度。

# 附录 C 常用物理常量表

表 C-1 空气的密度/(kg·cm<sup>-3</sup>)

压强/Pa 温度/℃	95 960	97 333	98 630	99 960	101 290	102 630	103 960
0	1.225	1.242	1.259	1.276	1.293	1.310	1.327
4	1.207	1.224	1.241	1.258	1.274	1.291	1.308
8	1.190	1.207	1.223	1.240	1.256	1.273	1.289
12	1.173	1.190	1.206	1.222	1.238	1.255	1.271
16	1.157	1.173	1.189	1.205	1.221	1.237	1.253
20	1.141	1.157	1.173	1.189	1.205	1.220	1.236
24	1.126	1.141	1.157	1.173	1.188	1.204	1.220
28	1.111	1.126	1.142	1.157	1.173	1.188	1.203

表 C-2 液体的密度

物质	密度 / (g · cm <sup>-3</sup> )	物质	密度/( g · cm <sup>-3</sup> )	物质	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )
丙酮	0.791	甲苯	0.8668	海水	1.01~1.05
乙醇	0.7893	重水	1.105	牛乳	1.03~1.04
甲醇	0.7913	汽油	0.66~0.75		
苯	0.8790	柴油	0.85~0.90		
三氯甲烷	1.489	松节油	0.87		
甘油	1.261	蓖麻油	0.96~0.97		

表 C-3 在标准大气压下不同温度的水的密度

温度 t/℃	密度 ρ/(kg/m <sup>3</sup> )	温度 t/℃	密度 ρ/(kg/m <sup>3</sup> )	温度 t/℃	密度 ρ/(kg/m <sup>3</sup> )
0	999.841	17	998.774	34	994.371
1	999.900	18	998.595	35	994.031
2	999.941	19	998.405	36	993.68
3	999.965	20	998.203	37	993.33
4	999.973	21	997.992	38	992.96
5	999.965	22	997.770	39	992.59
6	999.941	23	997.538	40	992.21
7	999.902	24	997.296	41	991.83
8	999.849	25	997.044	42	991.44
9	999.781	26	996.783	50	988.04
10	999.700	27	996.512	60	983.21
11	999.605	28	996.232	70	977.78
12	999.498	29	995.944	80	971.80
13	999.377	30	995.646	90	965.31
14	999.244	31	995.340	100	958.35
15	999.099	32	995.025		
16	998.943	33	94.702		



表 C-4 固体的密度

物质	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	物质	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	物质	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )
银	10.492	铅锡合金 <sup>⑦</sup>	10.6	软木	0.22~0.26
金	19.3	磷青铜 <sup>⑧</sup>	8.8	电木板（纸层）	1.32~1.40
铝	2.70	不锈钢 <sup>⑨</sup>	7.91	纸	0.7~1.1
铁	7.86	花岗岩	2.6~2.7	石蜡	0.87~0.94
铜	8.933	大理石	1.52~2.86	蜂蜡	0.96
镍	8.85	玛瑙	2.5~2.8	煤	1.2~1.7
钴	8.71	熔融石英	2.2	石板	2.7~2.9
铬	7.14	玻璃（普通）	2.4~2.6	橡胶	0.91~0.96
铅	11.342	玻璃（冕牌）	2.2~2.6	硬橡胶	1.1~1.4
锡	7.29	玻璃（火石）	2.8~4.5	丙烯酸树脂	1.182
锌	7.12	水晶玻璃	2.90~3.00	尼龙	1.11
黄铜 <sup>①</sup>	8.5~8.7	瓷器	2.0~2.6	聚乙烯	0.90
青铜 <sup>②</sup>	8.78	砂	1.4~1.7	聚丙烯	1.056
康铜 <sup>③</sup>	8.88	砖	1.2~2.2	聚氯乙烯	1.2~1.6
硬铝 <sup>④</sup>	2.79	混凝土 <sup>⑩</sup>	2.4	冰	0.917
德银 <sup>⑤</sup>	8.30	沥青	1.04~1.40	石英	2.50~2.80
殷钢 <sup>⑥</sup>	8.0	松木	0.52		
		竹	0.31~0.40		

注：①Cu70%，Zn30%；②Cu90%，Sn10%；③Cu60%，Ni40%；④Cu4%，Mg0.5%，Mn0.5%，其余为 Al；⑤Cu26.3%，Zn36.6%，Ni36.8，⑥Fe63.8，Ni36%，C0.2%；⑦Pb87.5%，Sn12.5%；⑧Cu79.7%，Sn10%，Sb9.5%，P0.8%；⑨Cr18%，Ni8%，Fe74%；⑩水泥 1 份，砂 2 份，碎石 4 份。

表 C-5 固体中的声速（沿棒传播的纵波）

固体	声速/(m · s <sup>-1</sup> )	固体	声速/(m · s <sup>-1</sup> )
铝	5 000	锡	2 730
黄铜（Cu70，Zn30）	3 480	钨	4 320
铜	3 750	锌	3 850
硬铝	5 150	银	2 680
金	2 030	硼硅酸玻璃	5 170
电解铁	5 120	重硅钾铅玻璃	3 720
铅	1 210	轻氯铜银冕玻璃	4 540
镁	4 940	丙烯酸树脂	1 840
莫涅尔合金	4 400	尼龙	1 800
镍	4 900	聚乙烯	920
铂	2 800	聚苯乙烯	2 240
不锈钢	5 000	熔融石英	5 760

表 C-6 液体中的声速（在 20℃下）

液体	声速/(m · s <sup>-1</sup> )	液体	声速/(m · s <sup>-1</sup> )
CCl <sub>4</sub>	935	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> （甘油）	1 923
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1 324	CH <sub>3</sub> OH	1 121
CHBr <sub>3</sub>	928	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	1 168
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	1 327.5	CS <sub>2</sub>	1 158.0

续表

液体	声速/(m·s <sup>-1</sup> )	液体	声速/(m·s <sup>-1</sup> )
CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	1 190	H <sub>2</sub> O	1 482.9
CHCl <sub>3</sub>	1 002.5	Hg	1 451.0
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	1 284.5	NaCl 4.8%水溶液	1 542

表 C-7 气体中的声速（在 101 325Pa、0℃下）

气体	声速/(m·s <sup>-1</sup> )	气体	声速/(m·s <sup>-1</sup> )
空气	331.45	H <sub>2</sub> O（水蒸气）（100℃）	404.8
Ar	319	He	970
CH <sub>4</sub>	432	N <sub>2</sub>	337
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	314	NH <sub>3</sub>	415
CO	337.1	NO	325
CO <sub>2</sub>	258.0	N <sub>2</sub> O	261.8
CS <sub>2</sub>	189	Ne	534
Cl <sub>2</sub>	205.3	O <sub>2</sub>	317.2
H <sub>2</sub>	1269.5		

表 C-8 固体的摩擦因数

I	II	静摩擦因数		动摩擦因数	
		干燥	涂油	干燥	涂油
钢铁	钢铁	0.7	0.005~0.1	0.5	0.03~0.1
钢铁	钢铁	—	0.18	0.23	0.13
钢铁	铝	0.95	0.05	0.95	0.3
镍	钢铁	—	—	0.64	0.18
铝	钢铁	0.61	—	0.47	—
钢	钢铁	0.53	—	0.36	0.18
黄铜	钢铁	0.51	0.11	0.44	—
黄铜	钢铁	—	—	0.30	—
铜	钢铁	1.05	—	0.29	—
铸铁	钢铁	1.10	0.2	0.15	0.070
铝	铝	1.05	0.30	1.4	—
玻璃	玻璃	0.94	0.035	0.4	0.09
铜	玻璃	0.68	—	0.53	—
聚四氟乙烯	聚四氟乙烯	0.04	—	0.04	—
聚四氟乙烯	钢铁	0.04	—	0.04	—

注：物体 I 在物体 II 上静止或运动的情况。

表 C-9 固体的线膨胀系数

物质	温度范围/℃	$\alpha/(10^{-6}\text{℃}^{-1})$	物质	温度范围/℃	$\alpha/(10^{-6}\text{℃}^{-1})$
铝	0~100	23.8	锌	0~100	32
铜	0~100	17.1	铂	0~100	9.1
铁	0~100	12.2	钨	0~100	4.5
银	0~100	19.6	石英玻璃	20~100	0.56
金	0~100	14.3	窗玻璃	20~100	9.5

续表

物质	温度范围/℃	$\alpha/(10^{-6}\text{℃}^{-1})$	物质	温度范围/℃	$\alpha/(10^{-6}\text{℃}^{-1})$
钢(0.05%碳)	0~100	12.0	花岗石	20	6~9
康铜	0~100	15.2	瓷器	20~70	3.1~4.1
铅	0~100	29.2	大理石	25~100	5~16

表 C-10 液体的体膨胀系数（101 325Pa 下）

物质	温度/℃	体膨胀系数/ $10^{-3}\text{℃}^{-1}$	物质	温度/℃	体膨胀系数/ $10^{-3}\text{℃}^{-1}$
丙酮	20	1.43	水	20	0.207
乙醚	20	1.66	水银	20	0.182
甲醇	20	1.19	甘油	20	0.505
乙醇	20	1.08	苯	20	1.23

表 C-11 在 20℃时某些金属的弹性模量  $E$

金属	吉帕/GPa	牛顿·m <sup>-2</sup> /(N·m <sup>-2</sup> )	金属	吉帕/GPa	牛顿·m <sup>-2</sup> /(N·m <sup>-2</sup> )
铝	70.00~71.00	7.000~7.100×10 <sup>10</sup>	锌	80.00	8.000×10 <sup>10</sup>
钨	415.0	4.150×10 <sup>11</sup>	镍	205.0	2.050×10 <sup>11</sup>
铁	190.0~210.0	1.900~2.100×10 <sup>11</sup>	铬	240.0~250.0	2.400~2.500×10 <sup>11</sup>
铜	105.0~130.0	1.050~1.300×10 <sup>11</sup>	合金钢	210.0~220.0	2.100~2.200×10 <sup>11</sup>
金	79.00	7.900×10 <sup>10</sup>	碳钢	200.0~210.0	2.000~2.100×10 <sup>11</sup>
银	70.00~82.00	7.000~8.200×10 <sup>10</sup>	康铜	163.0	1.630×10 <sup>11</sup>

注：弹性模量的值跟材料的结构、化学成分及加工制造方法有关，因此在某些情况下， $E$  的值可能跟表中所列的不同。

表 C-12 部分液体的黏度系数

液体名称	温度/℃	$\eta/(\times 10^{-3})\text{Pa}\cdot\text{s}$	液体名称	温度/℃	$\eta/(\times 10^{-3})\text{Pa}\cdot\text{s}$
水	0	1.787	乙醇	0	1.780
	5	1.519		20	1.190
	10	1.307	酒精	0	1.773
	15	1.134		40	0.834
	20	1.002	甘油	-20	1.34×10 <sup>5</sup>
	25	0.8904		0	1.21×10 <sup>4</sup>
	30	0.7975		5	6.26×10 <sup>3</sup>
水	40	0.6529	甘油	15	2.33×10 <sup>3</sup>
	50	0.5468		20	1.49×10 <sup>3</sup>
	60	0.4665		25	945
	70	0.4042		300	629
	80	0.3547	蓖麻油	10	2420
	90	0.3147		20	986
	100	0.2818		40	231
甲醇	0	0.817	乙醚	0	0.296
	20	0.584		20	0.243

表 C-13 在 20℃时某些固体的比热容

物质	比热容		物质	比热容	
	kcal/(kg · K)	10 <sup>3</sup> J/(kg · K)		kcal/(kg · K)	10 <sup>3</sup> J/(kg · K)
铝	0.214	0.895	镍	0.115	0.481
黄铜	0.0917	0.380	银	0.056	0.234
铜	0.092	0.385	钢	0.107	0.447
铂	0.032	0.54	锌	0.093	0.389
生铁	0.13	0.54	玻璃	0.14~0.22	0.585~0.920
铁	0.115	0.481	冰	0.43	1.797
铅	0.0306	0.130	水	0.999	4.176

表 C-14 某些液体的比热容

物质	温度/℃	比热容		温度/℃	比热容	
		kcal/(kg · K)	10 <sup>3</sup> J/(kg · K)		kcal/(kg · K)	10 <sup>3</sup> J/(kg · K)
乙醇	0	2.30	0.55	20	2.47	0.59
甲醇	0	2.43	0.58	20	2.47	0.59
乙醚	—	—	—	20	2.34	0.56
水	0	4.220	1.009	20	4.182	0.999
弗利昂-12	—	—	—	20	0.84	0.20
变压器油	0~100	1.88	0.45	—	—	—
汽油	10	1.42	0.34	50	2.09	0.50
水银	0	0.1464	0.0350	20	0.1390	0.0332

表 C-15 气体的导热系数（101 325Pa 下）

物质	温度/K	导热系数	物质	温度/K	导热系数
		10 <sup>-2</sup> W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>			10 <sup>-2</sup> W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
CH <sub>4</sub>	300	3.43	Hg	476	0.77
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	300	1.04	N <sub>2</sub>	300	2.298
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	373	2.09	O <sub>2</sub>	300	2.674
H <sub>2</sub>	300	18.15	空气	300	2.61
H <sub>2</sub> O	380	2.45	空气	1000	6.72

表 C-16 液体的导热系数

物质	温度/K	导热系数	物质	温度/K	导热系数
		10 <sup>-1</sup> W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>			10 <sup>-1</sup> W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	300	1.44	甘油	293	2.83
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	293	1.68	石油	293	1.50
H <sub>2</sub> O	273	5.62	硅油	—	—
H <sub>2</sub> O	293	5.97	（分子量）162	333	0.993
H <sub>2</sub> O	360	6.74	（分子量）1200	333	1.32
Hg	273	84	（分子量）15800	333	1.60

表 C-17 固体的导热系数

物质	温度/K	导热系数	物质	温度/K	导热系数
		$10^{-2}\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$			$10^{-2}\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Ag	273	4.28	锰钢	273	0.22
Al	273	2.35	康钢	273	0.22
Au	273	3.18	不锈钢	273	0.14
C (金刚石)	273	6.60	镍铬合金	273	0.11
C (石墨) ⊥c	273	2.50	硼硅酸玻璃	300	0.011
Ca	273	0.98	软木	300	0.00042
Cu	273	4.01	耐火砖	500	0.0021
Fe	273	0.835	混凝土	273	0.0084
Ni	273	0.91	玻璃布	300	0.00034
Pb	273	0.35	云母 (黑)	373	0.0054
Pt	273	0.73	花岗岩	300	0.016
Si	273	1.70	赛璐珞	303	0.0002
Sn	273	0.67	橡胶 (天然)	298	0.0015
水晶 //c	273	0.12	杉木	293	0.00113
水晶 ⊥c	273	0.068	棉布	313	0.0008
石英玻璃	273	0.014	呢绒	303	0.00043
黄铜	273	1.20			

表 C-18 液体的表面张力系数

物质	接触气体	温度/℃	表面张力系数 / $10^{-3}\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
水	空气	10	74.22
	空气	30	71.18
	空气	50	67.91
	空气	70	64.4
	空气	100	58.9
水银	空气	15	487
乙醇	空气	20	22.3
甲醇	空气	20	22.6
乙醚	蒸气	20	16.5
甘油	空气	20	63.4

表 C-19 在海平面上不同纬度处的重力加速度

纬度 $\varphi$ /℃	$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	纬度 $\varphi$ /℃	$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	纬度 $\varphi$ /℃	$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
0	9.7804	40	9.8017		
5	9.7808	42	9.80350	58	9.8176
10	9.7820	44	9.8053	60	9.8192
15	9.7839	45	9.8067	65	9.8229
20	9.7865	46	9.8071	70	9.8261
25	9.7896	48	9.88089	80	9.8306
30	9.7933	50	9.8107	85	9.8318
32	9.7949	52	9.8125	90	9.8322
35	9.7974	54	9.8142		
37	9.7990	56	9.8159		

注：表中所列数值是根据公式  $g = 9.78049(1 + 0.004288 \sin^2 \varphi - 0.000062 \varphi)$  算出的，其中  $\varphi$  为纬度。

## 参 考 文 献

- [1] 杨述武, 等. 普通物理实验 I (力学、热学部分) (第 5 版). 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [2] 覃以威, 等. 大学物理实验 (I). 桂林: 广西师范大学出版社, 2010.
- [3] 龙涛, 等. 大学物理实验. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [4] 张映辉. 大学物理实验. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 钱锋, 潘人培. 大学物理实验 (修订版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [6] 赵光强, 申莉华, 李玉琮. 大学物理实验教程 (第 2 版). 北京: 北京邮电大学出版社, 2014.
- [7] 龚志强, 李水. 大学物理实验教程. 北京: 北京邮电大学出版社, 2011.
- [8] 肖信. Origin 8.0 实用教程: 科技作图与数据分析. 北京: 中国电力出版社, 2009.